ELETRÔNICA RÁDIO E TV

SUMÁRIO

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
12ª LIÇÃO TEÓRICA
TRANSDUTORES ELETROACÚSTICOS

Introdução

Analisaremos, nesta lição teórica, alguns tipos de transdutores eletroacústicos de grande interesse prático, que são os **microfones, alto-falantes** e os **fonocaptadores**. Existe uma grande variedade de tipos desses transdutores, mas descreveremos apenas os mais usados, para não alongar em demasia o assunto. Além disso, é suficiente entender o princípio de funcionamento de cada tipo, porque as diferenças entre os transdutores eletroacústicos de um mesmo grupo se devem apenas a detalhes construtivos, que visam a melhorar a qualidade do produto, seja ela mecânica ou elétrica.

De um modo geral, chama-se de **transdutor** um dispositivo que tem por finalidade transformar um tipo de energia em outro. Mais corretamente, diríamos que o transdutor transfere a variação de uma grandeza para outra, de natureza diferente. Particularmente, quando a transformação é de energia elétrica em acústica e vice-versa, diz-se que o transdutor é **eletroacústico**. Para o nosso curso, interessam-nos, principalmente, os transdutores eletroacústicos, chamados de **microfone, fonocaptador, fone** e **alto-falante**.

I - Microfones

Os microfones são dispositivos que transformam uma onda sonora em força eletromotriz (ou corrente) de mesma variação. O princípio básico de funcionamento de um microfone pode ser resumido no seguinte: Todo som, ao atingir uma placa, exerce sobre ela uma pressão, ou seja, uma força em sua superfície. Se a placa for capaz de deslocar-se ou deformar-se, produzirá um trabalho mecânico, que será transformado em trabalho elétrico. A classificação dos transdutores em vários tipos baseia-se exclusivamente na maneira de transformarem o trabalho mecânico em energia elétrica.

Como as vibrações sonoras variam de freqüência e de amplitude, a corrente (ou tensão) fornecida pelo transdutor também variará no mesmo ritmo.

O microfone pode ser considerado como "ouvido elétrico". Realmente, sabemos que as ondas sonoras provocam a vibração do nosso tímpano, que é uma membrana. Essa membrana está ligada a nervos, que produzem pequenos pulsos elétricos, os quais são comunicados ao cérebro, e temos a sensação de som. No microfone, o processo é o mesmo. A membrana é um diafragma que comunica suas vibrações a um dispositivo sensível e este transforma tais vibrações em impulsos elétricos, que são levados ao amplificador.

1 - Tipos de microfones

a) Microfone de carvão

Basicamente, o microfone de carvão consiste de uma cápsula, geralmente chamada de **botão**, cheia de carvão pulverizado. Uma das faces da cápsula constitui o diafragma. Quando a onda sonora o atinge, este vibra e tais vibrações são transmitidas aos grãos de carvão, fazendo variar sua resistência, no mesmo ritmo.

Essa variação de resistência é transformada em variação de corrente, intercalando-se, em série com o botão, uma bateria.

Na **figura 1**, mostramos o microfone de carvão, em corte e seu esquema de uso. Na **figura 2** o aluno pode ver o microfone de carvão, em um de seus aspectos reais mais difundidos em telefonia.

Quando se deseja aumentar a tensão e/ou a corrente do sinal de saída do microfone de carvão, usam-se duas cápsulas em paralelo e, nesse caso, o microfone é conhecido como **microfone de carvão de dois botões**.

O microfone de carvão, devido a sua robustez e simplicidade, é largamente utilizado nos aparelhos telefônicos, embora apresente as seguintes desvantagens:

1ª) Necessita de corrente contínua para funcionar.

2ª) Produz um ruído, chamado **ruído de fundo**, que se percebe nos sons fracos. Esse ruído é conseqüência da passagem da corrente contínua através dos grãos de carvão.

3ª) Sua curva de resposta é muito estreita, cerca de 100 a 5.000 Hz; logo, o microfone de carvão só se presta à transmissão da palavra falada.

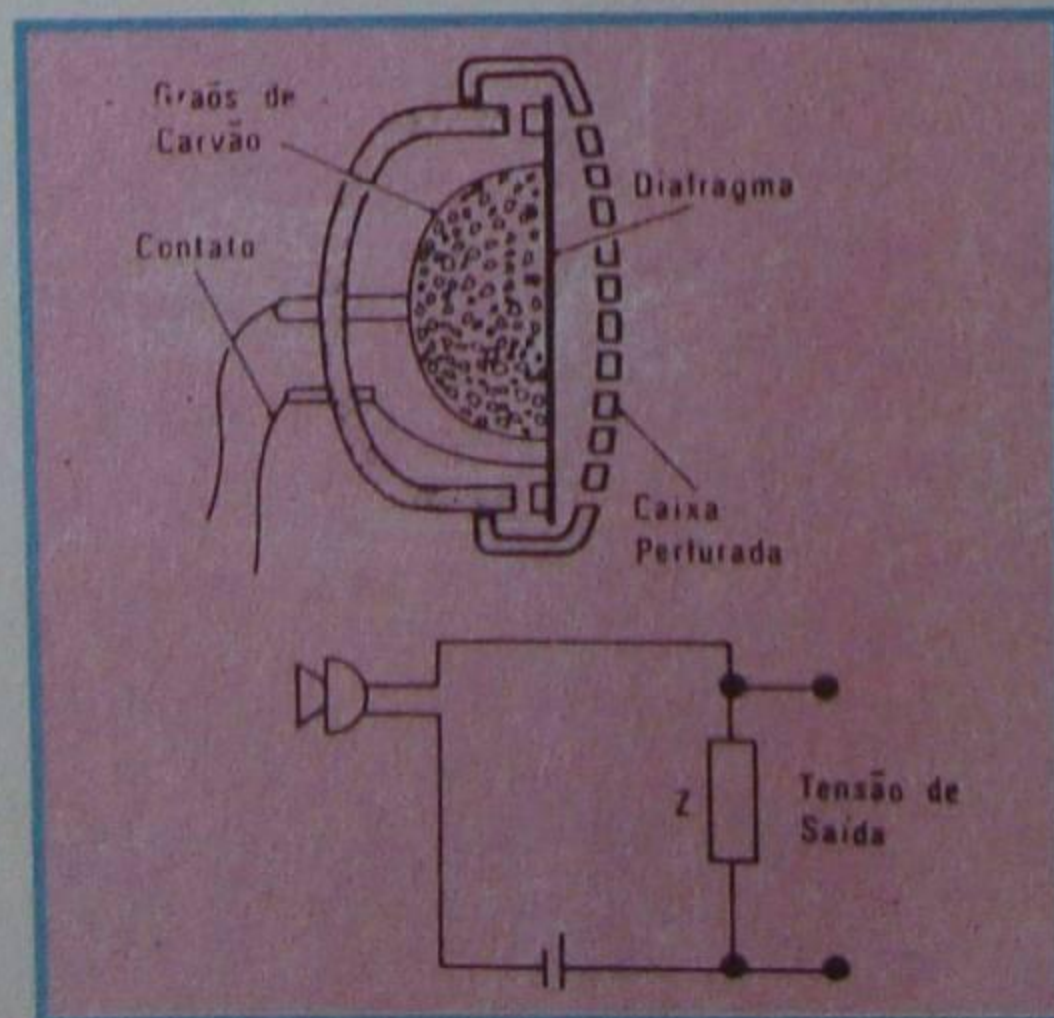



Figura1 - Corte e uso do microfone de carvão.

Figura 2 - Microfone de carvão.

4ª) Tem impedância baixa, o que exige o emprego de um transformador adaptador de impedâncias, a fim de poder ligá-lo à entrada dos circuitos amplificadores, que geralmente têm impedância alta.

5ª) Possui característica unidirecional de captação, isto é, responde somente a uma direção, que é aquela perpendicular ao diafragma.

b) Microfone de cristal

O microfone de cristal funciona com base no efeito piezoelétrico, que veremos com detalhes, posteriormente ao tratar dos fones de cristal.

O microfone de cristal consta essencialmente de uma placa de cristal de quartzo, fixa entre duas placas metálicas. Quando se fornece pressão às placas, elas deformam o cristal, aparecendo sobre o mesmo uma tensão elétrica. As vibrações sonoras atingem o diafragma e este as transfere ao cristal, como se pode concluir, examinando o corte esquemático do microfone, que apresentamos na **figura 3**.

Os microfones de cristal foram e ainda são muito empregados e apresentam uma série de **vantagens**, que passamos a indicar:

1ª) Boa qualidade de reprodução, ou seja, curva de resposta plana dentro de cerca de 30 a 15.000 Hz, nos microfones bem projetados.

2ª) Tensão de saída relativamente alta.

3ª) Impedância de saída elevada, o que permite que o microfone seja ligado diretamente à entrada dos amplificadores, sem necessidade de transformador-adaptador de impedância.

Não obstante essas vantagens, os microfones de cristal apresentam a desvantagem de serem muito sensíveis a agentes externos, tais como umidade,

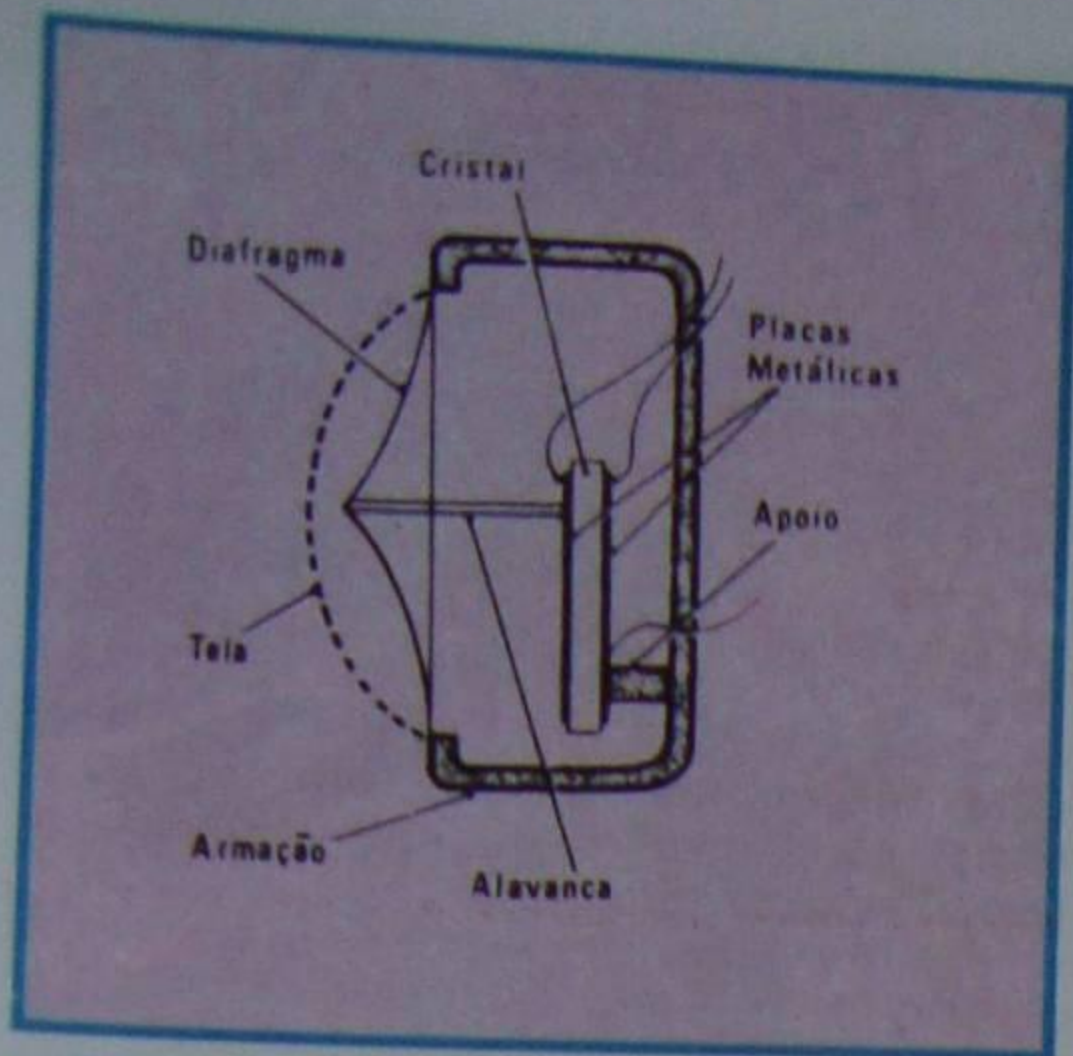



Figura 3 - Corte do microfone de cristal.

mudança de temperatura e choques mecânicos.

c) Microfone dinâmico

Tal microfone funciona pelo mesmo princípio eletromagnético que o do alto-falante dinâmico, ou seja, que todo condutor que se move cortando as linhas de força de um campo magnético é sede de uma força eletromotriz induzida e, inversamente, se aplicarmos uma tensão a um condutor imerso em um campo magnético, ele se moverá. Esta última conseqüência explica o funcionamento do alto-falante dinâmico, e a primeira explica o funcionamento do **microfone dinâmico**.

O microfone dinâmico consiste numa bobina móvel, situada no campo magnético de um ímã. Preso à bobina móvel, há um diafragma que a ela transmite as vibrações das ondas sonoras. O movimento da bobina gera uma força eletromotriz que tem as mesmas variações do som. Essa força eletromotriz é aplicada ao amplificador.

Na **figura 4**, mostramos o corte esquemático dos microfones dinâmicos e, na **figura 5**, o aluno observa a aparência de um tipo muito comum de microfone dinâmico.

O microfone dinâmico tem as seguintes vantagens:

1ª) Boa qualidade de reprodução, sendo muito comuns os microfones dinâmicos que alcançam de 30 a 15.000 Hz.

2ª) Ótima resistência mecânica, podendo sofrer tratamento brusco, sem danificar-se. Além disso, é insensível ao calor e à umidade.

As desvantagens do microfone dinâmico são:

1ª) Pequena tensão de saída, o que exige pré-amplificação, antes de seu sinal ser aplicado à entrada de um amplificador.

2ª) Baixa impedância de saída, obrigando o uso de transformador-adaptador. Geralmente, esse transformador é incorporado ao próprio microfone e, em alguns casos, tem terminais para diversas impedâncias.

d) Microfone de velocidade

Essencialmente, o microfone de

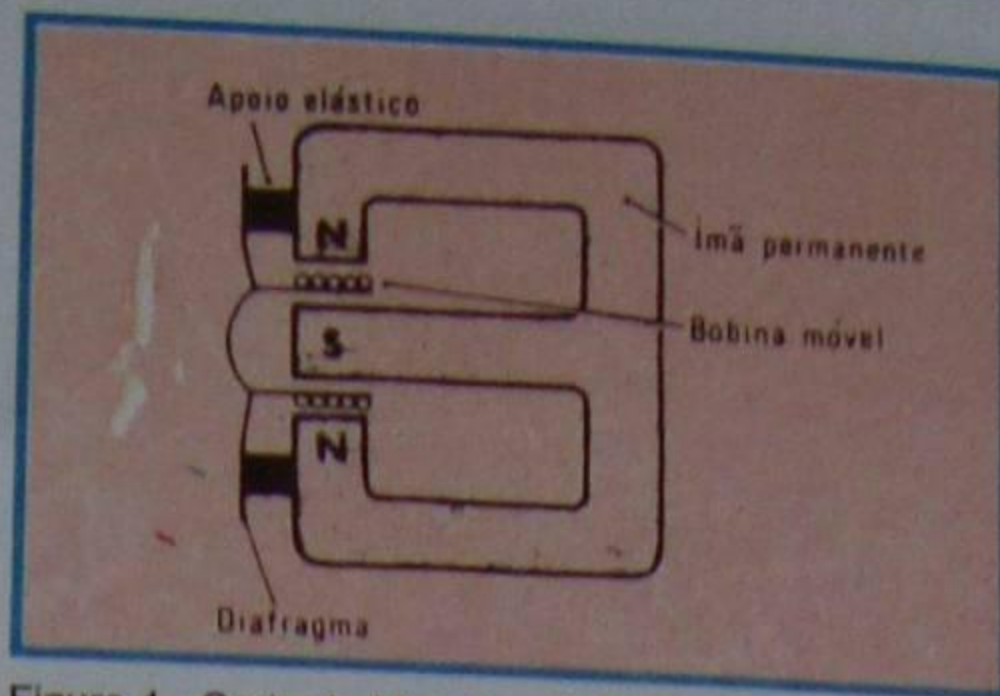



Figura 4 - Corte do Microfne dinâmico.

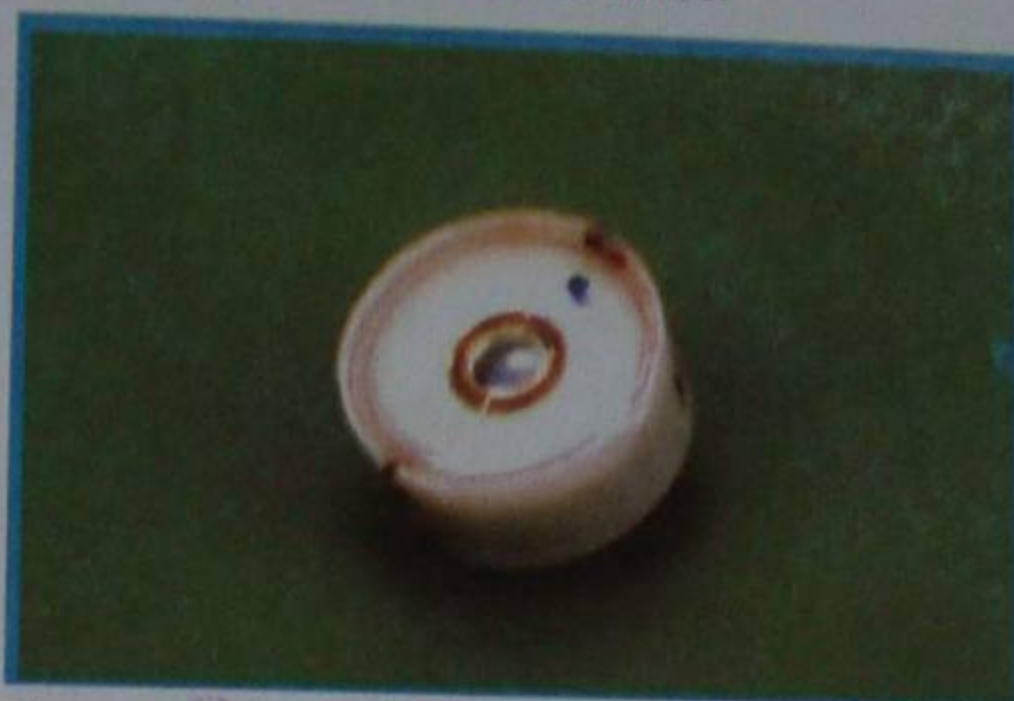



Figura 5 - Exemplo de microfone dinâmico.

velocidade consta de uma fita de alumínio muito leve e corrugada, situada no campo magnético de um ímã de grande intensidade. A fita é disposta de modo que sua largura fique paralela às linhas de força do ímã. Quando a fita se movimenta no campo magnético, aparece em suas extremidades uma força eletromotriz de variação semelhante às suas vibrações. Em princípio, tal microfone é semelhante ao dinâmico, com a diferença de que a bobina móvel foi substituída pela fita. Como não há diafragma de grande área, mas simplesmente uma fita, não é a pressão sonora, mas a velocidade do som, que faz a fita vibrar. Daí o nome de **microfone de velocidade** e também de **microfone de fita** que esse transdutor recebe.

O microfone de fita tem como vantagens: sua **robustez**, o que o torna resistente a choques mecânicos, e sua excelente **resposta de freqüência**.

Como desvantagens, podemos citar: a baixa impedância, a baixa tensão de saída e sua grande sensibilidade ao transporte, pois o movimento excita a fita e produz ruídos de fundo desagradáveis. Na **figura 6**, apresentamos o corte esquemático de um microfone de fita.

e) Microfone de condensador

O microfone de condensador, também conhecido por microfone de eletreto, aplica o princípio da variação da capacitância pela modificação da espessura do dielétrico. Sabemos que a capacitância de um capacitor diminui, quando suas armaduras são distanciadas, e aumenta, quando suas armaduras são aproximadas. Essa propriedade é aproveitada para a construção de um microfone. Na **figura 7**, mostramos um desenho esquemático de ligação e o aspecto construtivo de um microfone de condensador. Como se nota, há duas placas metálicas, paralelas e próximas. Uma delas é o diafragma do microfone. A onda sonora pressiona o diafragma e fá-lo vibrar, alterando a distância entre ele e a placa fixa e, em conseqüência, a capacitância do conjunto varia. Essa modificação da capacitância provoca variação de mesmo ritmo no circuito ligado ao microfone.

O microfone de condensador apresenta a seguinte vantagem: ótima qualidade de reprodução, com resposta de freqüência bem larga, indo desde os 20 Hz até valores superiores a 15 000 Hz.

Como desvantagens, podemos apontar:

1ª) Tensão de saída muito baixa, o que exige o emprego de pré-amplificador especial, quase sempre incorporado ao próprio microfone.

2ª) Necessita de uma fonte de tensão contínua, externa, para seu funcionamento.

3ª) Difícil construção, pois o espaço correspondente ao dielétrico deve ser perfeitamente fechado, para que não entre poeira. É bom ressaltar que qualquer partícula que se infiltre no dielétrico dará origem a ruídos. Além disso, a pressão no interior do microfone deve ser mantida constante, uma vez que sua capacitância é afetada pelas variações da pressão atmosférica.

A título de ilustração, mostramos, na **figura 8**, o aspecto físico de um microfone de eletreto simples, enquanto que, na **figura 9**, o aluno pode observar o aspecto de um microfone de eletreto

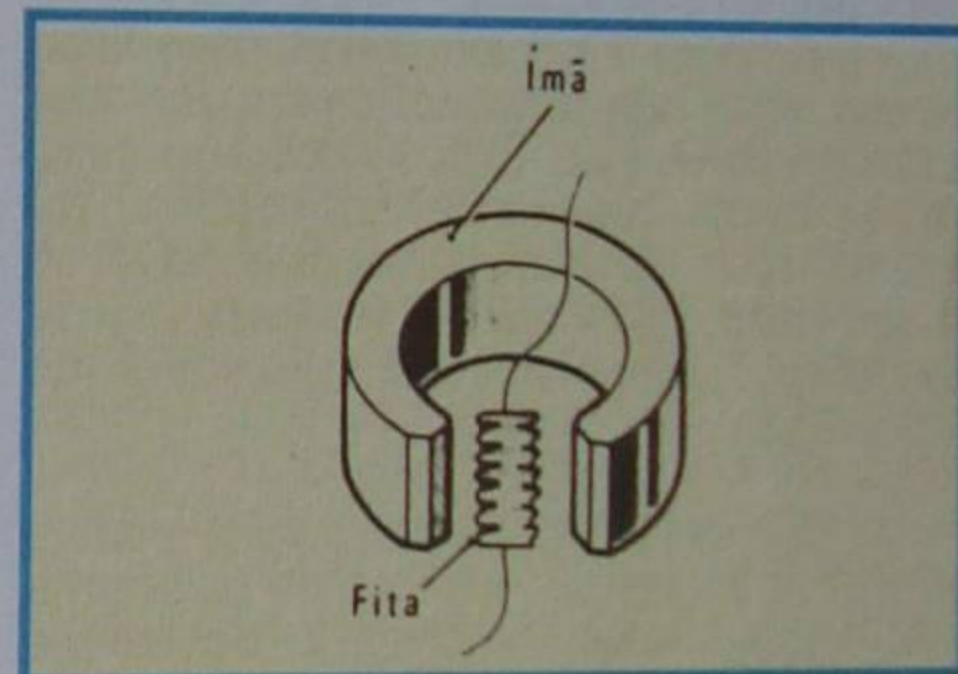



Figura 6 - Corte do microfone de fita.

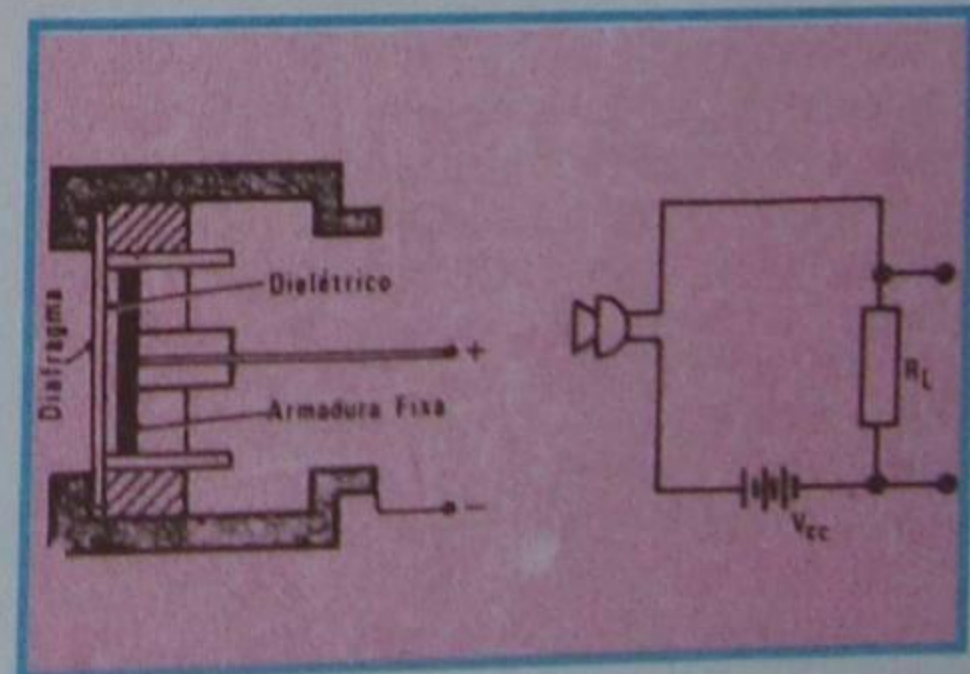



Figura 7 - Corte e ligação do microfone de eletreto.

Figura 8 - Microfone de eletreto de 2 terminais.

dotado de amplificador interno. Este amplificador é composto por um transistor especial (do tipo FET, que será visto em momento oportuno); o esquema de ligações deste tipo de microfone pode ser visto juntamente com a figura 9.

f) Microfone de cerâmica

Este tipo de microfone é semelhante em funcionamento ao microfone de cristal, ou seja, é do tipo piezoelétrico. A diferença está em que a lâmina de cristal é substituída por uma de material cerâmico, que possui propriedades piezoelétricas altamente desenvolvidas. O microfone de cerâmica apresenta todas as vantagens do de cristal, ou seja, resposta de frequência plana e de faixa larga, alta impedância e elevada tensão de saída. Por outro lado, não é muito sensível à temperatura nem à umidade.

Os microfones vistos até o presente momento podem assumir diversas aparências físicas externas, não servindo isto para a classificação de seus tipos. Como exemplo, ilustramos, na **figura 10** alguns tipos de encapsulamentos para microfones.

g) Microfone para guitarra

Nos instrumentos musicais elétricos (não eletrônicos), utiliza-se um tipo de microfone que foi batizado por **captador para guitarra** ou violão.

Embora o funcionamento desse tipo de microfone possa basear-se em qualquer dos princípios que expusemos, ou seja, capacitivo, resistivo, magnético ou piezoelétrico, tem-se dado preferência ao magnético, devido à facilidade de construção, robustez e boa qualidade de reprodução.

Em princípio, tal microfone consta de um ímã servindo de núcleo para uma bobina. O fluxo magnético do ímã é fechado através da corda de aço do instrumento. Quando a corda vibra, o fluxo varia e induz na bobina uma corrente de mesma variação. Essa corrente é amplificada e convertida em som. Na **figura 11**, mostramos o esquema de um captador, enquanto que, a título de comparação, mostramos, na **figura 12**, o captador aberto. Na **figura 13** ilustramos um exemplo de captador em seu aspecto real. Nos tipos de microfones representados, cada ímã (que, devido a sua forma, é chamado de **botão**) fica embaixo de uma corda. Esta vibra nas proximidades de um dos pólos, porém não fecha o circuito magnético, como está representado no esquema. São as linhas de força que se fecham através dos pólos e, com a vibração, a corda modifica o fluxo e induz corrente.

Note o aluno que as cordas não podem ser de "nylon", mas exclusivamente metálicas (aço).

2 - Especificações de um microfone

As qualidades de um microfone são facilmente avaliadas, através do confronto de suas especificações elétricas e mecânicas, que os fabricantes costumam fornecer. Essas especificações são:

a) Curva de resposta

É um gráfico de escala logarítmica, no eixo horizontal, onde se marcam as freqüências, e de escala natural, no eixo vertical, onde se marca a relação de potência (eventualmente tensão) em decibéis. O decibel, como já tivemos oportunidade de ver em outra lição, é definido como sendo 20 vezes o logaritmo da relação entre a tensão (ou 10 vezes a relação de potência) de saída do microfone, no caso, e uma tensão de saída tomada para comparação. Toma-se para comparação a tensão que o microfone desenvolve na freqüência de 1 KHz. A partir daí, comparam-se todas as outras tensões com essa, fazendo-se a relação logarítmica que citamos.

Por exemplo, suponhamos que um determinado microfone tenha saída de 1 Volt, na freqüência de 1 KHz. Suponhamos, agora, que sua saída seja de 0,1 V a 100 Hz, 0,5 V a 500 Hz, 1,5 V a 5 KHz, 0,1 V a 10 KHz e 0,01 V a 15 KHz. Tomando a tensão de 1 V a 1 KHz como elemento de comparação, podemos fazer as relações:

$$\text{a 100 Hz}: \frac{V_{100\ Hz}}{V_{1\,000\ Hz}} = \frac{0{,}1}{1} = 0{,}1$$

$$\text{a 500 Hz}: \frac{V_{500\ Hz}}{V_{1\,000\ Hz}} = 0{,}5$$

$$\text{a 1000 Hz}: \frac{V_{1\,000\ Hz}}{V_{1\,000\ Hz}} = \frac{1}{1} = 1$$

$$\text{a 5 KHz}: \frac{V_{5\ KHz}}{V_{1\,000\ Hz}} = \frac{1{,}5}{1} = 1{,}5$$

$$\text{a 10 KHz}: \frac{V_{10\ KHz}}{V_{1\,000\ Hz}} = \frac{0{,}1}{1} = 0{,}1$$

$$\text{a 15 KHz}: \frac{V_{15\ KHz}}{V_{1\,000\ KHz}} = \frac{0{,}01}{1} = 0{,}01$$

Se construírmos um gráfico em cujo eixo horizontal marcamos a freqüência em escala logarítmica e, no vertical, as relações que acabamos de calcular, teremos a curva de resposta do microfone. Essa curva mostramos na **figura 14**. Evidentemente, um microfone com essa resposta de freqüência seria péssimo.

Como afirmamos, os fabricantes não costumam indicar as relações em números naturais, mas em decibéis. Para que o aluno tenha uma noção dessa unidade física, indicamos, na própria figura 14, os valores correspondentes em db.

O microfone, para ser bom, deve ter resposta plana, isto é, a curva o mais coincidente possível com o eixo de 0 db. Consideram-se como freqüências-limites (inferior e superior) da curva de respostas aquelas cuja relação de tensão é de 3 db.

b) Nível de saída

O nível de saída é outra informação útil, porque nos permite concluir se o microfone tem tensão de saída suficiente para excitar os amplificadores usuais ou se há necessidade de pré-amplificação. O nível de saída também costuma ser indicado em decibéis. Como o decibel é uma indicação relativa, ela só terá significado quando for especificada a impedância do microfone.

Por exemplo, um microfone que apresenta um nível de saída de - 72 db em impedância de 10 KΩ dará uma tensão de saída de cerca de 1 mV.

Quando não se conhece a impedância de referência, não se pode calcular a tensão, mas pode-se concluir que um microfone de - 50 db dará mais saída que outro de - 70 db, porque, quanto maior a quantidade de db negativos, menor é a saída.

Note o aluno que não entramos em detalhes sobre o cálculo de decibéis, porque, isso envolve o conhecimento da teoria dos logaritmos. Entretanto, se citamos o decibel, é porque ele está incorporado a todas as especificações técnicas de eletrônica, e o aluno não pode ignorá-lo, mesmo que não penetre a fundo em seu conteúdo.

c) Direcionalidade

O microfone é chamado de:
- **unidirecional**, quando capta o som proveniente de uma única direção;
- **bidirecional**, quando capta o som de duas imagens;
- **omnidirecional** ou **não-direcional**, quando capta o som de qualquer direção.

A característica direcional do microfone é um dado de interesse, porque permite ao técnico escolher aquele que melhor se adapte a uma determinada aplicação. Por exemplo, na escolha de um microfone para propaganda de rua ("public address"), não é conveniente optar pelo omni ou bidirecional, mas pelo unidirecional, que capta o som da voz do locutor, exclusivamente.

A característica de direcionalidade do microfone costuma ser indicada em forma de gráfico, mas de um tipo que ainda não apresentamos ao aluno, que é o **gráfico** ou **diagrama polar**. Esse gráfico não tem eixos fixos, como nos gráficos cartesianos, mas um ponto fixo, que é o pólo, e um raio, que gira em redor do pólo, dando uma volta completa. A escala, nesse caso, é graduada em graus. À guisa de ilustração, mostramos na **figura 15** o diagrama de direcionalidade de um tipo de microfone Philips.

É interessante notar que a característica direcional de um microfone não depende só de seu tipo, mas da freqüência do som. O aluno verifica isso na figura 15, observando, ainda, que para freqüências de 100 a 1 KHz, o microfone é omnidirecional; para 4 KHz, sua captação é melhor na frente do diafragma e, para 8 KHz, ele é quase unidirecional.

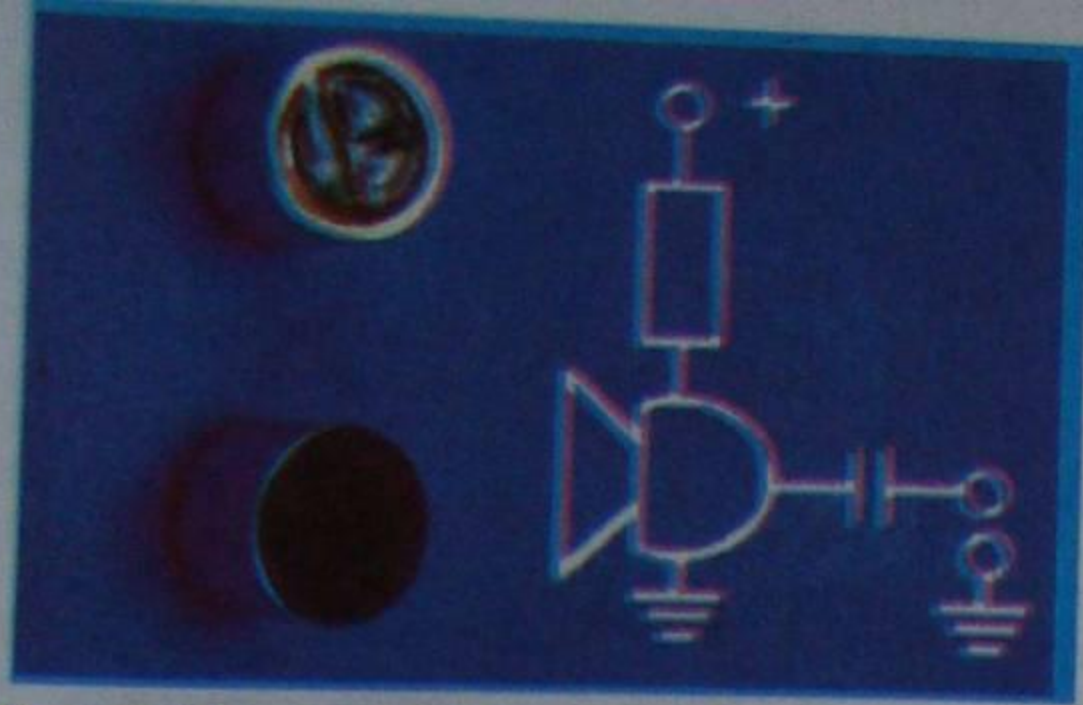



Figura 9 - Microfone de eletreto de 3 terminais.

d) Impedância

A indicação de impedância do microfone, conforme já frisamos várias vezes, permite aquilatar a possibilidade de ligá-lo diretamente à entrada do amplificador, ou se há necessidade de usar um adaptador.

Por exemplo, se dispomos de um amplificador cuja impedância de entrada é de 100 KΩ e de um microfone de impedância de 600 Ω, precisamos usar um adaptador de impedâncias, seja ele um transformador ou um circuito eletrônico.

e) Características mecânicas

Neste item das especificações, o fabricante indica as dimensões do microfone, peso, material de que é feito, tipo de acabamento, etc.

Tendo as especificações, é fácil ao técnico escolher o tipo adequado para uma aplicação específica. É uma questão de bom senso. Por exemplo, admitamos que se queira fazer uma instalação eletroacústica em um veículo, para propaganda de rua. É claro que não se deve usar microfone omnidirecional e nem que tenha resposta de freqüência muito ampla, pois só se necessita de transmitir palavras. Por outro lado, não se deve escolher microfone sensível a choques mecânicos. Então, procura-se um microfone unidirecional de baixa resposta de freqüência, leve e barato. Seria

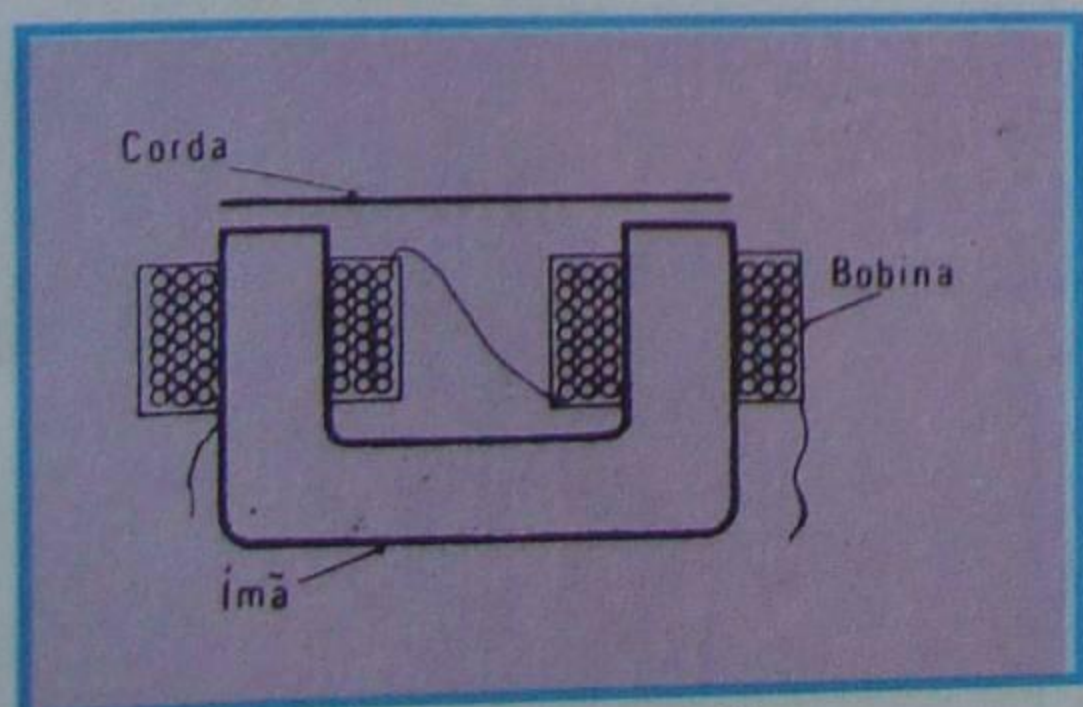
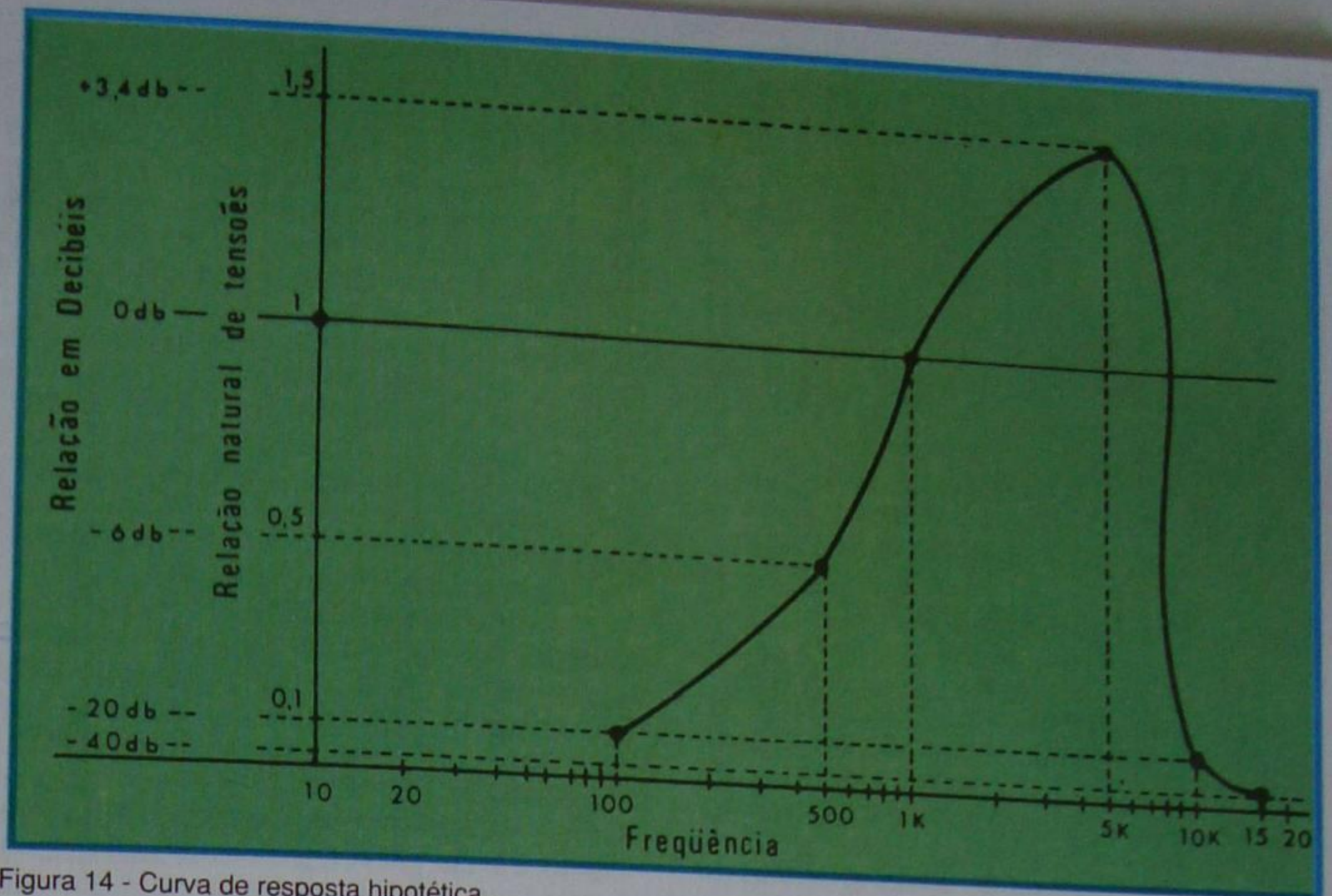



Figura 14 - Curva de resposta hipotética.

escolhido um tipo de carvão, cerâmica ou mesmo dinâmico. Quanto as demais características, ou seja, impedância e nível de saída, seriam escolhidas de acordo com o amplificador.

Evidentemente, se a instalação sonora fosse para um estúdio de emissora, o problema seria inverso e o microfone seria outro.

II - Fonocaptadores

Chama-se **fonocaptador** ao transdutor destinado a transformar as vibrações mecânicas ou as variações magnéticas em corrente elétrica. O fonocaptador utilizado na leitura de discos recebe a denominação popular de "cápsula fonográfica", e o usado na leitura de fita recebe a denominação genérica de "cabeça magnética".

1 - Cápsulas fonográficas

Descreveremos aqui as cápsulas fonográficas de uso mais generalizado. No momento, não nos preocuparemos com o processo de gravação, pois ele será examinado posteriormente.

a) Cápsula de cristal

O fonocaptador de cristal utiliza o fenômeno piezoelétrico, que já estudamos. Consta, tal fonocaptador, de uma placa de cristal à qual se acopla mecanicamente um estilete chamado **agulha**. As vibrações da agulha, quando percorre o sulco do disco, produzem a deformação do cristal e geram uma força eletromotriz, que varia do mesmo modo. Essa pequena tensão é aplicada à entrada de um amplificador e reproduz o som gravado, no alto-falante.

Na **figura 16**, mostramos o desenho esquemático de uma cápsula de cristal. Quanto à aparência da mesma, citamos que tal cápsula possui forma similar à mostrada na **figura 17.**

As cápsulas de cristal têm as seguintes vantagens:

1ª) Nível de saída elevado, podendo, em algumas cápsulas especiais, atingir mais de dois Volts. Nas cápsulas normais, a tensão de saída está nas proximidades de um Volt.

2ª) Impedância elevada, o que permite que seja ligada diretamente à

Figura 10 - Carcaças de microfones.

Figura 11 - Corte de captador magnético.

Figura 12 - Captador aberto.

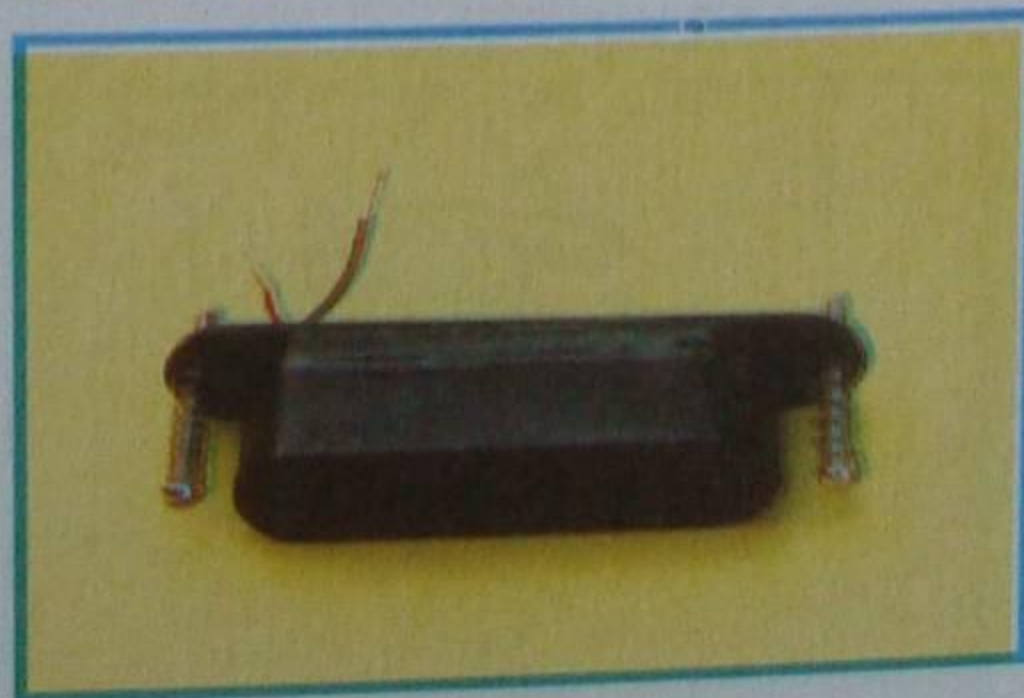



Figura 13 - Exemplo de captador.

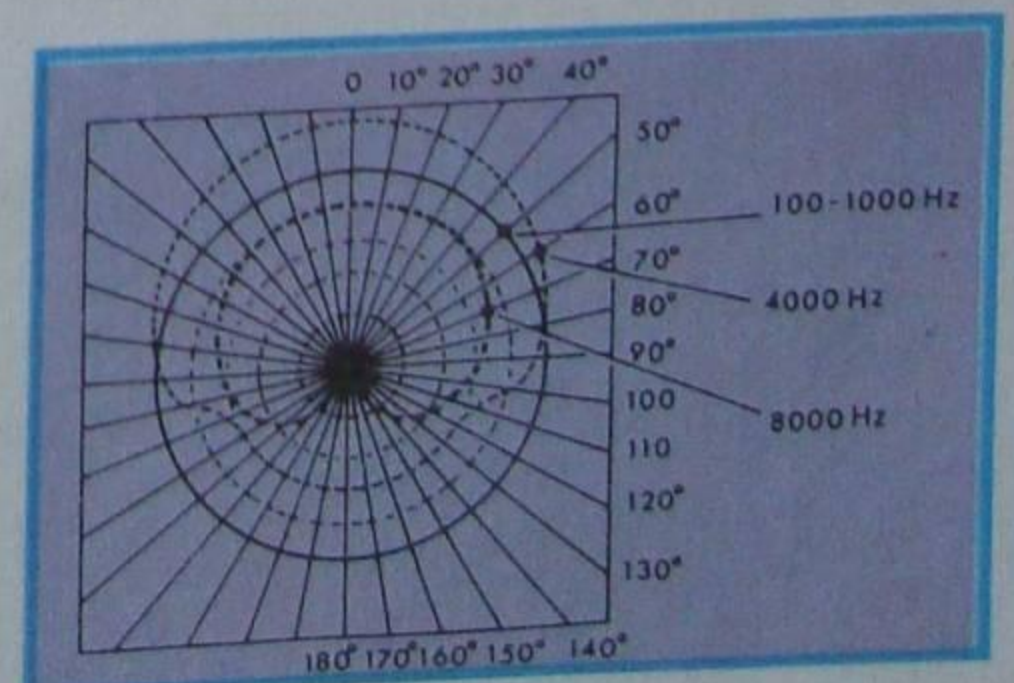



Figura 15 - Diagrama polar.

entrada de amplificadores transistorizados de alta impedância.

3ª) Preço baixo, daí resultando sua larga aceitação e uso em toca-discos de baixo custo.

Como desvantagens, podemos citar:

1ª) Sua fragilidade, pois a cápsula de cristal é muito sensível a golpes mecânicos e a variação de temperatura.

2ª) Pobre resposta de freqüência. O fonocaptador de cristal tem resposta baixa, nos sons graves, e bastante deformação.

b) Cápsula de cerâmica

As cápsulas de cerâmica apresentam construção semelhante à das cápsulas de cristal, pois também são do tipo piezoelétrico, onde o cristal foi substituído por uma placa de material cerâmico.

Têm sobre as de cristal a vantagem de serem menos sensíveis à variação de temperatura e mais resistentes a choques mecânicos. Além disso, passaram por enorme desenvolvimento desde sua criação, em 1946, sendo encontradas, atualmente, cápsulas de alta qualidade e custo relativamente baixo. A cápsula de cerâmica tem nível de saída elevado, baixa distorção e ampla resposta de freqüência. Na **figura 18**, mostramos o aspecto de uma cápsula de cerâmica das mais conhecidas.

c) Cápsulas magnéticas

Neste tipo de fonocaptador, a vibração mecânica é transformada em corrente elétrica, de acordo com o princípio do eletromagnetismo, que já conhecemos. Segundo esse princípio, haverá indução de força eletromotriz (corrente) em um condutor, sempre que houver variação no fluxo magnético que o atinge. De acordo com a maneira de variar o fluxo, podemos ter dois tipos básicos de cápsulas magnéticas, ou seja:

1º) **Cápsula dinâmica**: Em princípio, funciona do mesmo modo que o microfone ou alto-falante dinâmico. Consiste em uma bobina presa a uma agulha e imersa em um campo magnético. As variações existentes no sulco da gravação fazem com que a agulha vibre e, com ela, também a bobina. Em conseqüência, aparece nos terminais da bobina uma força eletromotriz induzida de mesma característica. Essa força eletromotriz, muito fraca, é aplicada à entrada de um amplificador conveniente e convertida em som. Na **figura 19**, apresentamos o desenho esquemático de um fonocaptador do tipo descrito.

2º) **Cápsula de relutância variável**: Neste tipo de cápsula, é usado o princípio da variação do fluxo magnético pela variação da relutância. Assim, monta-se a bobina do fonocaptador fixa ao ímã e a agulha fixa a uma haste que se move, no entreferro do ímã, no mesmo ritmo das vibrações da gravação. Essa variação de fluxo provocará a indução de uma diminuta força eletromotriz de audiofreqüência, que será amplificada e convertida em som. Na **figura 20**, apresentamos o desenho esquemático do princípio de funcionamento das cápsulas de relutância variável e que consiste no tipo mais popular de cápsula. Quanto à sua aparência física, a mesma pode ser vista na **figura 21**.

As cápsulas magnéticas têm sobre as piezoelétricas (cristal e cerâmica) a vantagem de proporcionar resposta de freqüência mais ampla e qualidade de reprodução muito melhor. Por este motivo, têm gozado da preferência dos projetistas de cadeias de alta-fidelidade. Entretanto, são de custo bem mais elevado do que as piezoelétricas; de nível de saída muito baixo, o que exige o uso de pré-amplificador especial; de baixa impedância, captam indução com muita facilidade. Além disso, são relativamente mais pesadas do que as piezoelétricas e requerem **equalização**, isto é, um pré-amplificador que acentue a resposta dos graves e atenue a dos agudos, para que se obtenha resposta plana em toda a faixa de áudio.

Pelo exposto, pode parecer que a cápsula magnética só tem desvantagem em relação às piezoelétricas e não deveria ser usada. Entretanto, sua excelente resposta de freqüência e qualidade de reprodução (baixa distorção) faz desse tipo de cápsula o ideal para alta-fidelidade. Os inconvenientes citados, com exceção do custo, podem ser eliminados através de cuidados especiais.

d) Cápsulas estereofônicas

Conforme estudaremos detalhadamente em outra parte do curso, o som estereofônico é proveniente de dois amplificadores iguais, chamados de **canais**, dispostos à direita e à esquerda do ouvinte, de maneira a preservar a característica direcional do ouvido. Assim, quando se reproduzem sons diferentes em cada canal, tem-se a impressão de espaço (daí a denominação estereofônico, pois estéreo significa espaço). Ora, para que os canais reproduzam em estéreo, há necessidade de que as informações do disco também sejam em estéreo, o que realmente acontece, gravando-se as informações (voz, música, etc.) nas duas faixas laterais do sulco do disco. Uma das faixas corresponde à gravação do canal direito e será reproduzida pelo amplificador da direita, e a outra, pertencente ao canal esquerdo, será reproduzida pelo amplificador esquerdo.

Pois bem, para reproduzir as gravações estereofônicas, foram desenvolvidas cápsulas especiais, chamadas **estereofônicas**. Essas cápsulas tanto podem ser do tipo magnético como do piezoelétrico e constam de duas unidades em um só invólucro, convenientemente ligadas a uma única agulha. As vibrações da agulha nas faixas leterais do sulco são comunicadas à cápsula correspondente e levadas, em separado, ao amplificador.

Na **figura 22**, mostramos o diagrama do princípio de uma cápsula estereofônica. O aspecto da cápsula estereofônica é igual ao da estudada até

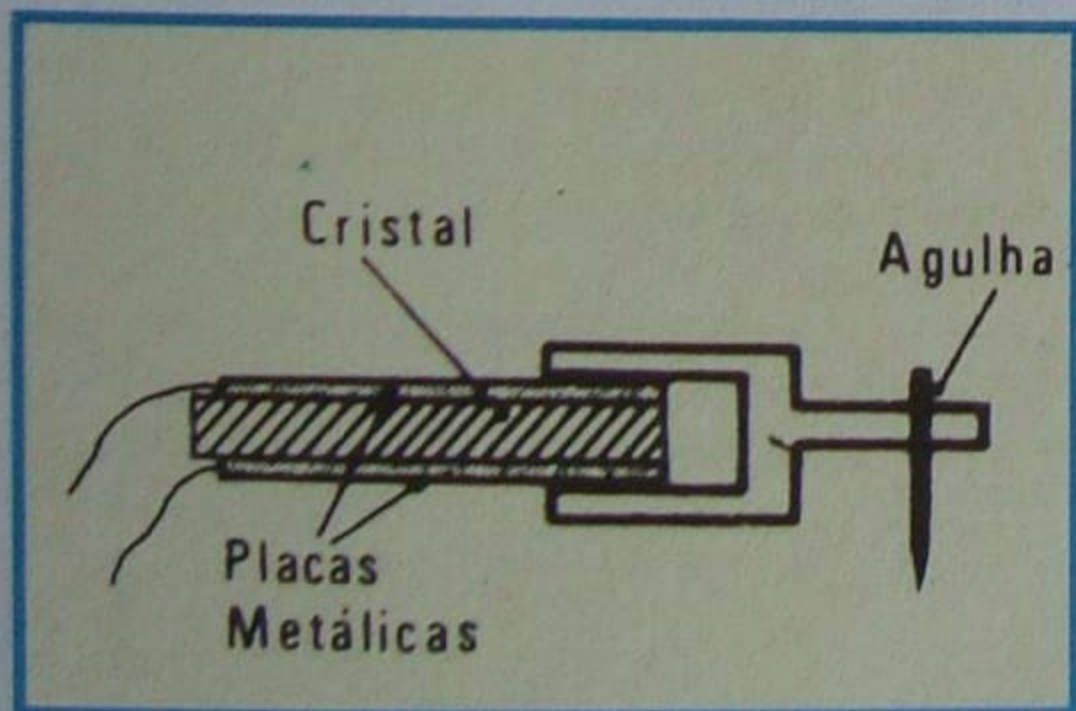



Figura 16 - Corte de uma cápsula de cristal.

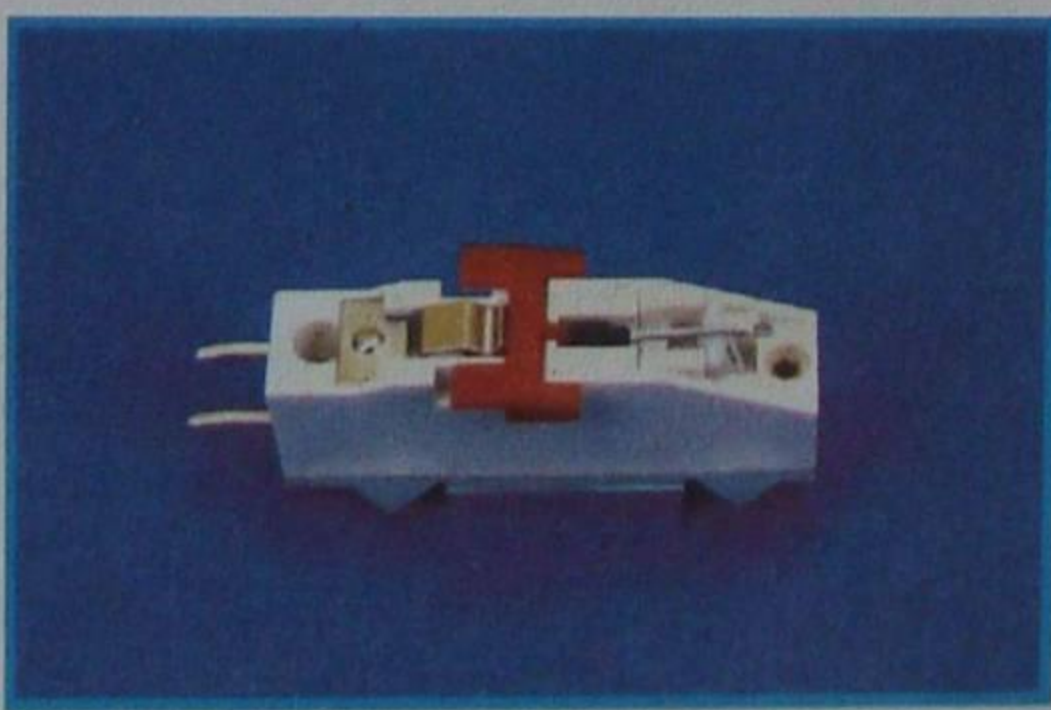



Figura 18 - Cápsula cerâmica.

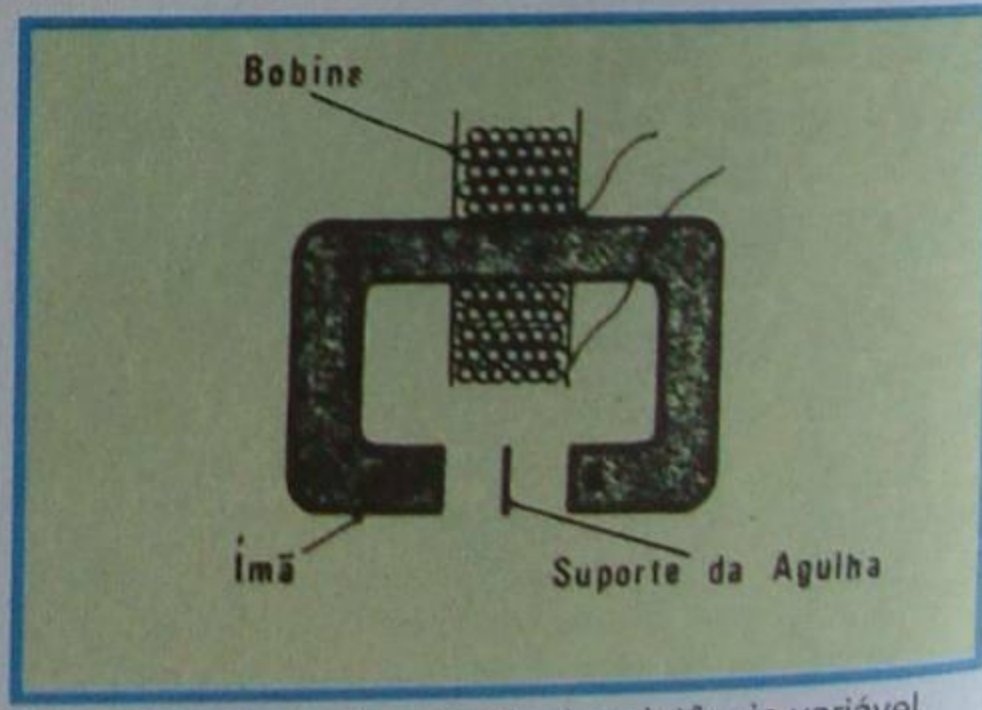



Figura 20 - Corte da cápsula de relutância variável.

Figura 17 - Aparência da cápsula.

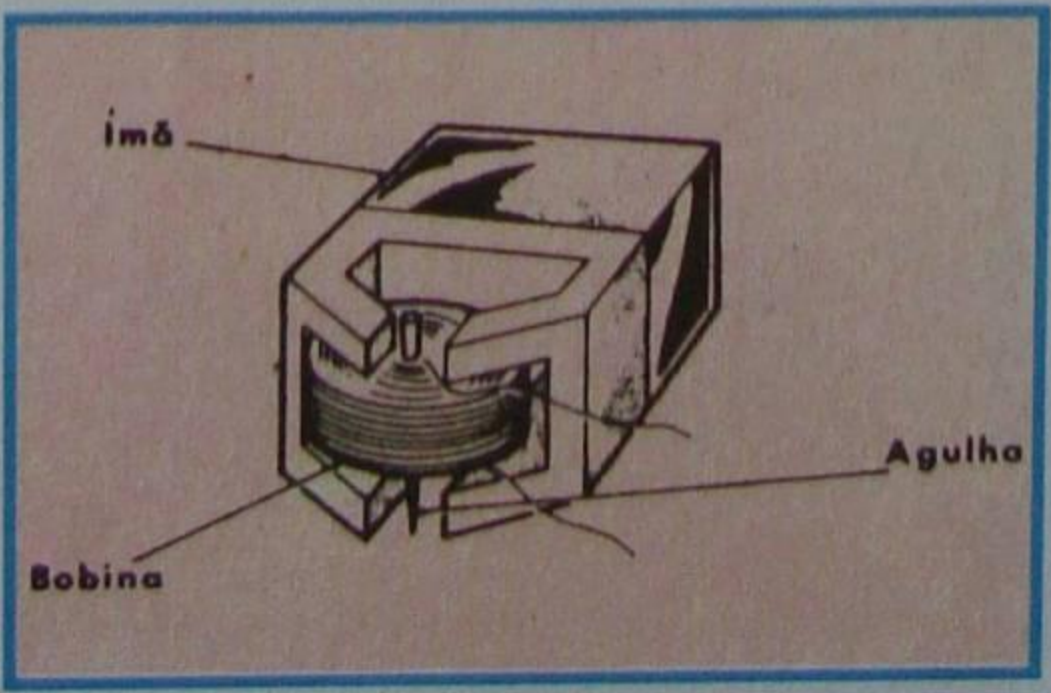



Figura 19 - Desenho esquemático da cápsula magnética.

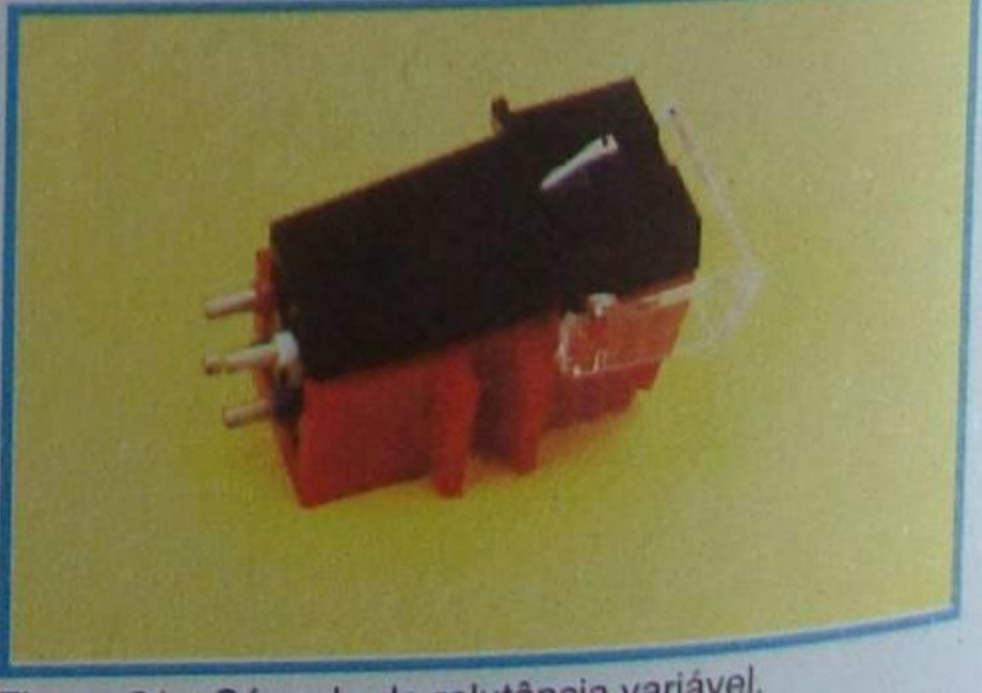



Figura 21 - Cápsula de relutância variável.

aqui; por exemplo, a cápsula mostrada na figura 17, de cristal, é estereofônica; já na **figura 23**, mostramos uma cápsula cerâmica estereofônica, para que se verifique que esta difere da monofônica (mostrada na figura 18), em aspecto, somente por apresentar 4 terminais de ligação, correspondendo dois para cada canal.

e) Cabeças magnéticas

Uma outra forma de registro de som, consiste em impressionar uma fita ou fio de material ferromagnético, através da variação do campo magnético, segundo a intensidade da corrente de audio-freqüência. Esse tipo de impressão recebeu a denominação popular de **gravação em fita**, embora não se trate de gravação no sentido lato da palavra.

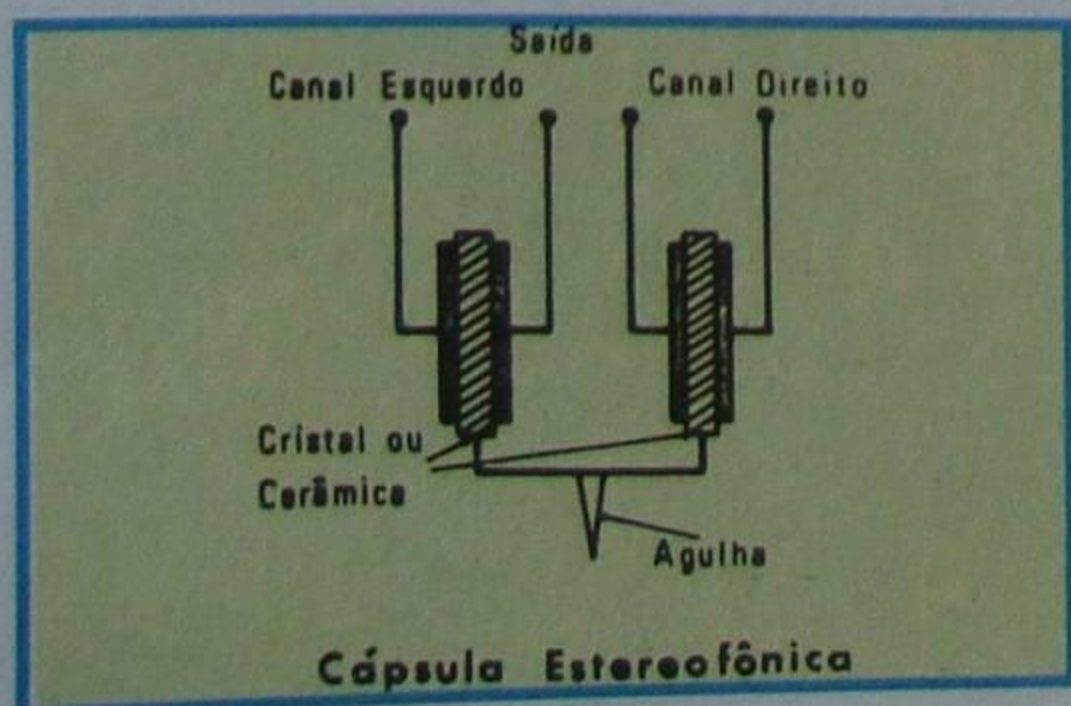
Para se fazer a gravação da fita, usa-se o fonocaptador chamado de **cabeça gravadora** e, para reproduzir, emprega-se a **cabeça reprodutora**. Nos gravadores e tape-decks domésticos, a mesma cabeça é utilizada tanto para gravar como para reproduzir.

A **cabeça gravadora** consta, em princípio, de uma bobina que tem um ímã como núcleo. A essa bobina aplica-se a corrente de audiofreqüência correspondente ao som que se deseja gravar. Na **figura 24**, mostramos o desenho esquemático de uma cabeça gravadora para compreensão de seu princípio de funcionamento. Na **figura 25** é mostrado seu aspecto real.

O processo de gravação, basicamente, pode ser descrito da seguinte maneira:

Aplica-se a tensão de audio-freqüência à bobina da cabeça gravadora. Com isso, cria-se novo campo magnético, que fará variar o campo do ímã permanente, de acordo com a variação da corrente. Agora, obriga-se uma fita de plástico, recoberta com uma camada de material ferromagnético, a deslocar-se em frente ao entreferro do ímã.

À medida que a fita se move, vai se magnetizando com intensidade que varia, em cada ponto da fita, de acordo com a intensidade da corrente de áudio. Diz-se, então, que a fita está gravada.

Para reproduzir o som, aplica-se o processo inverso, ou seja, obriga-se a fita a deslocar-se na frente da cabeça reprodutora. O campo magnético variável da fita, passando defronte ao entreferro, obriga o campo do ímã a variar no mesmo ritmo. Em conseqüência dessa variação, induz-se uma força eletromotriz na bobina, que será aplicada à entrada do amplificador conveniente.

Como o aluno percebe, o processo de reprodução é exatamente o inverso do de gravação, daí a possibilidade de se usar a mesma cabeça para as duas funções.

O processo de "desgravação" da fita chama-se **apagamento**. Para apagar a fita, pode-se usar um ímã permanente ou outra cabeça denominada, agora, **cabeça apagadora**. A cabeça apagadora é semelhante à gravadora, só que a ela se aplica uma corrente contínua, isto é, sem variação e de valor suficiente para saturar a fita.

A gravação em fita possui algumas vantagens sobre a do disco. Poderíamos citar, entre elas, que o tempo de duração de uma gravação em fita pode ser consideravelmente maior do que o do disco; menor ruído, (teoricamente), porque não existe agulha; possibilidade de regravação da fita; menor desgaste (teoricamente).

No momento oportuno, quando tratarmos dos gravadores de fita, daremos mais detalhes sobre o assunto.

2 - Especificações

As cápsulas fonográficas, exatamente como os microfones e alto-falantes, têm suas características determinadas cuidadosamente em laboratório e especificadas pelo seu fabricante. O usuário, seja ele projetista ou técnico reparador, deve conhecê-las, para poder utilizá-las em sua melhor condição de rendimento. As especificações mais comuns são:

a) **Nível de saída**: Indicado em Volt ou db, representa a tensão gerada pela cápsula na freqüência de 1 000 Hz sobre a carga indicada.

b) **Resistência de carga**: Corresponde à resistência de entrada do amplificador.

c) **Força de tração**: Indica o peso recomendado para o conjunto cápsula + braço de "pick-up", ou seja, a força que a ponta da agulha deve exercer sobre o disco. Essa especificação deve ser observada sempre, pois, se a força for insuficiente, a agulha poderá correr sobre o disco ou não reproduzir as freqüências corretamente, devido à falta de atrito com as paredes do sulco. Se a força for excessiva, haverá desgaste prematuro da agulha e/ou disco.

d) **Curva de resposta**: É semelhante à que apresentamos para o microfone.

e) **Outras**: De acordo com o tipo do fonocaptador, se é magnético ou piezoelétrico, o fabricante poderá indicar, também, a capacitância, resistência ôhmica, compliância, etc.

Figura 24 - Cabeça gravadora.

f) **Especificações mecânicas**: Aqui são indicadas as dimensões, furações, peso, tipo de agulha recomendada, etc.

III - Fones e alto-falantes

Os fones e alto-falantes são os componentes que transformam os impulsos elétricos de áudio em ondas sonoras.

Como é natural, esses transdutores sofreram aperfeiçoamentos notáveis, desde os incipientes gramofones do começo do século até os mais sofisticados sistemas de alta-fidelidade de nossos dias.

Deixando de lado o gramofone, que era um reprodutor de som totalmente mecânico, podemos afirmar que os modernos transdutores apenas evoluíram nos detalhes, porque os princípios de funcionamento continuam os mesmos de várias décadas atrás. Em sendo assim, passaremos a expor esses princípios sem nos ater aos detalhes; não que eles não sejam importantes na qualidade do som reproduzido, mas porque se trata, quase sempre, de aperfeiçoamento no material utilizado na confeção do transdutor. Tal melhoria de reprodução, evidentemente, vem acompanhada de grande elevação de custo. Isto explica o fato de um transdutor especial para alta-fidelidade, aparentemente igual ao normal, ter preço muitíssimo mais elevado, chegando, em alguns casos, a custar 20 a 30 vezes mais do que aquele. Mesmo assim, o emprego de transdutores de ótima qualidade em reprodutores de alta-fidelidade é imperioso, pois, conforme estudaremos mais tarde, uma cadeia de alta-fidelidade é formada basicamente por três elos - fonocaptador, amplificador e alto-falante -, e a deficiência

Figura 22 - Cápsula estereofônica.

Figura 23 - Cápsula cerâmica estéreo.

Figura 25 - Cabeça gravadora.

Figura 26- Alguns fones.

de um deles compromete o bom funcionamento dos outros dois.

1 - Fones

Os fones são transdutores capazes de transformar um sinal elétrico de pequena potência em som de pouca intensidade, já que o fone é projetado para ser colocado bem próximo do ouvido (ver **figura 26**). Trata-se, portanto, de um dispositivo de uso individual, largamente utilizado quando se deseja ouvir o som em ambiente de muito ruído, porque, adaptando-se perfeitamente ao ouvido, impede que grande parte do ruído ambiental o atinja. Além disso, a fonte sonora fica muito próxima do tímpano e a atenuação dos sons é pequena.

Há dois tipos principais de fone: magnético e à cristal.

a) Fone magnético

O fone magnético é constituído fundamentalmente das seguintes partes:

- ímã permanente;
- enrolamentos;
- diafragma.

Na **figura 27**, apresentamos um fone magnético em corte.

Quanto ao ímã permanente e enrolamentos, cremos não ser necessária maior explicação, pois o aluno já os conhece bem. Vejamos o que vem a ser o **diafragma**:

Chamamos de **diafragma** uma membrana vibrátil de ferro, de reduzida espessura, para que tenha bastante flexibilidade, isto é, para que possa vibrar com facilidade.

Nos fones, o diafragma é circular e, para que não perca sua flexibilidade, é apoiado somente pelas bordas.

O ímã permanente fica situado de modo que seus pólos fiquem próximos ao centro do diafragma.

O funcionamento do fone magnético

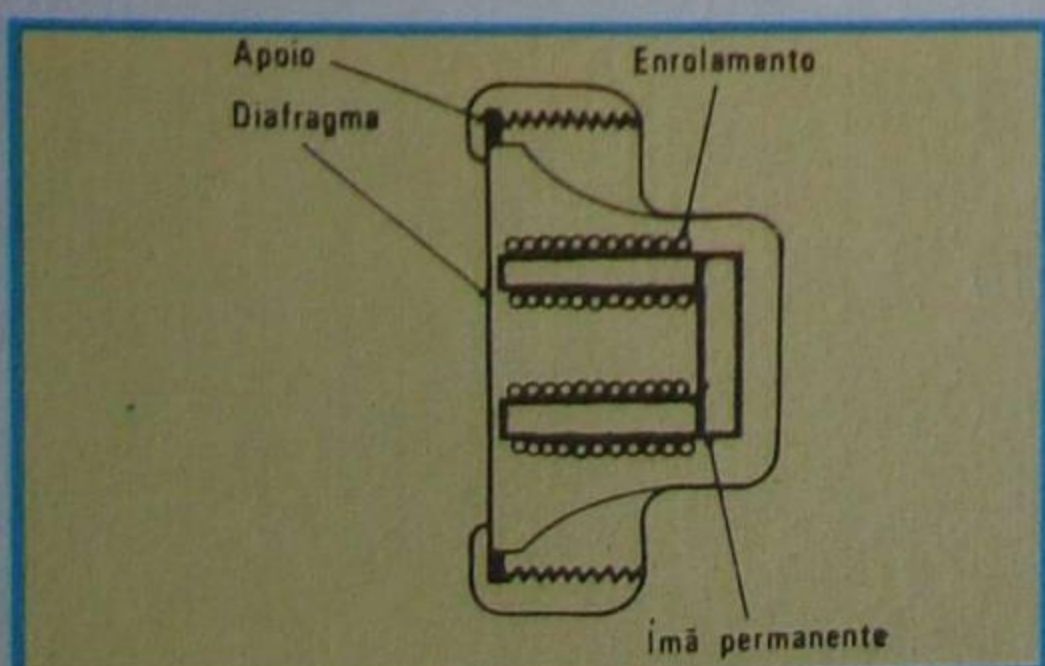
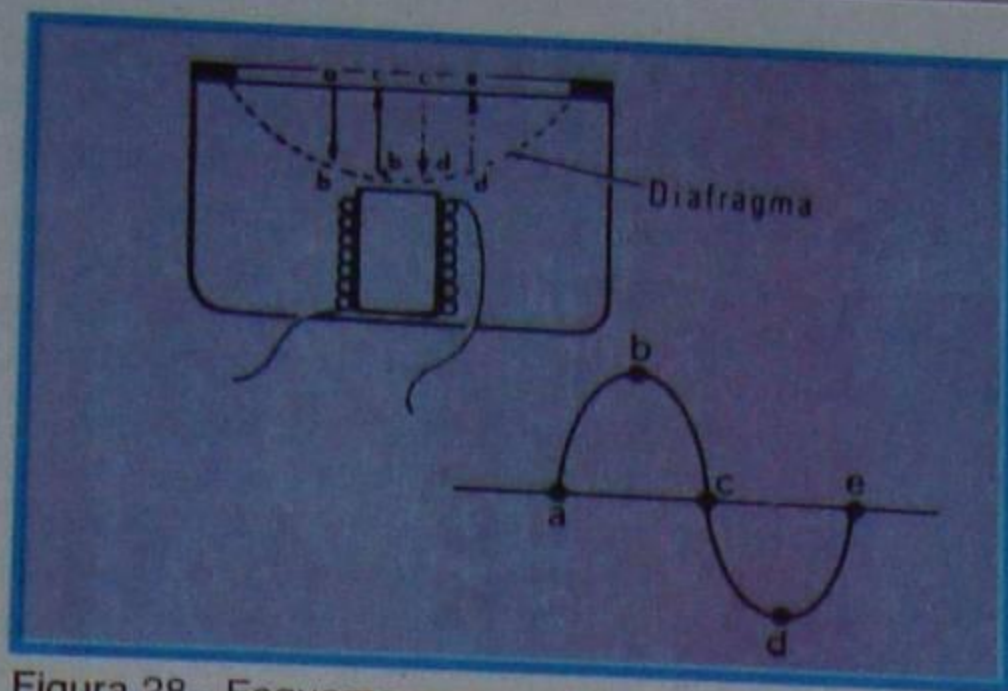



Figura 28 - Esquema para estudo.

é o seguinte:

O diafragma fica constantemente atraído pelo campo magnético do ímã. Ao ser aplicada uma corrente alternada aos enrolamentos, o campo magnético modifica-se de acordo com a CA aplicada, obrigando o diafragma a vibrar e a produzir o som.

De fato, sabemos que, ao circular corrente por um enrolamento, cria-se um campo magnético. Como a corrente é alternada, o campo também o será, ou seja, atrairá ou repelirá o diafragma de acordo com o sentido da corrente. Mas, observe o aluno o que acontece durante um ciclo: Quando a corrente está variando no sentido positivo, de **a** a **b**, na **figura 28**, o campo magnético cresce de 0 ao valor máximo e o diafragma é atraído. Para a variação da corrente de **b** a **c**, o campo passa do máximo ao zero e o diafragma volta à posição de repouso. Agora, quando a corrente vai do **c** ao **d**, o diafragma é novamente atraído, pois, embora a corrente tenha sofrido inversão, o efeito sobre o diafragma é o mesmo, porque o pólo sul atrai o ferro, da mesma maneira que o pólo norte. Quando a corrente passa de **d** a **e**, o diafragma volta à posição inicial. Pelo exposto, conclui-se que, enquanto a corrente varia de **um** ciclo; o diafragma vibra **duas** vezes; conseqüentemente, o som original é reproduzido com o dobro da freqüência.

Exatamente para evitar o fenômeno analisado anteriormente é que se usa o ímã permanente como núcleo do enrolamento.

De fato, a existência do campo magnético constante, devido ao ímã, manterá o diafragma sempre atraído. Nesse caso, quando a corrente alternada do sinal que atravessa o enrolamento produzir campo magnético de mesmo sentido que o existente, os dois campos se somarão e atrairão mais o diafragma.

Isto corresponde a variação da corrente de **a** até **b**, da figura 28. Quando a corrente varia de **b** até **c** e o campo magnético produzido pela corrente alternada se anula, o diafragma não volta

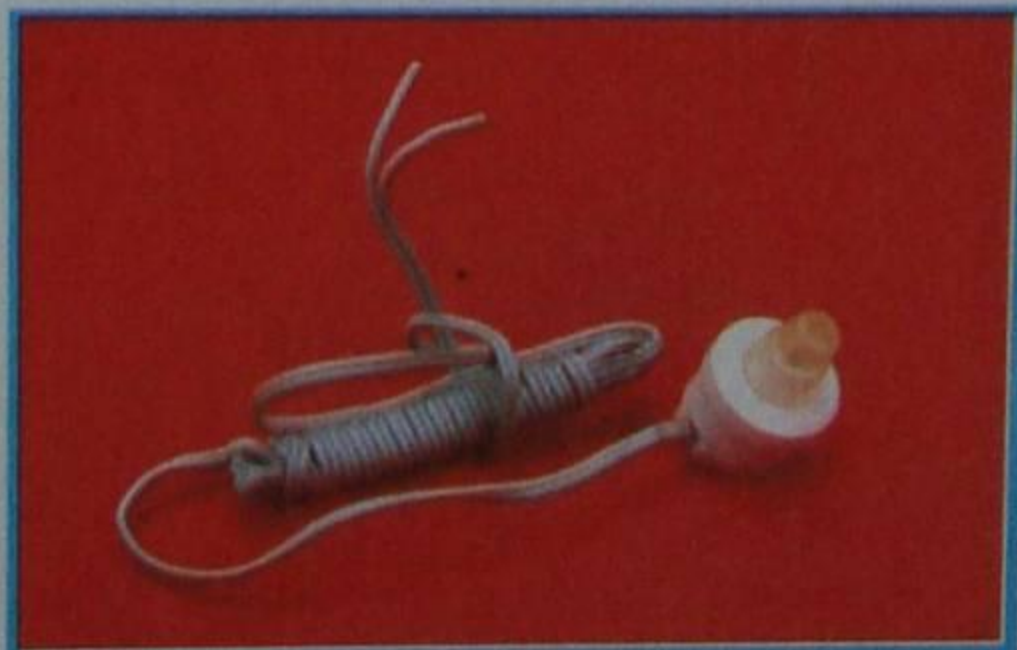
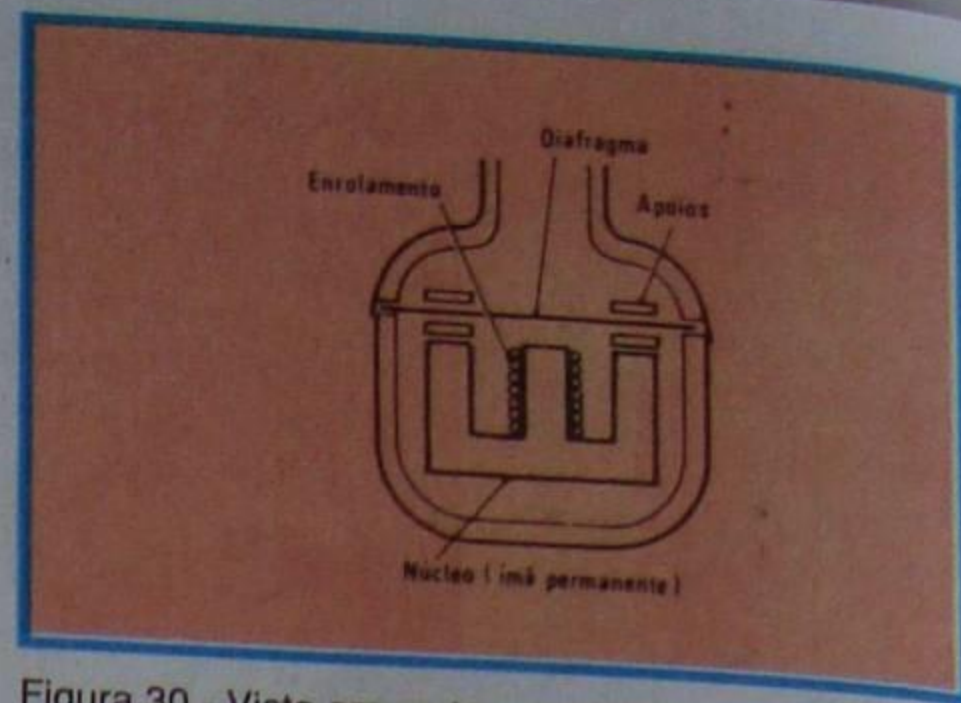



Figura 30 - Vista em corte.

imediatamente à posição inicial, porque, devido à pequena distância a que ele ficou do núcleo, sofre mais forte atração.

Quando a corrente se inverte, trecho **cd**, os dois campos magnéticos subtraem-se e o diafragma afasta-se do pólo. Quando a corrente passa de **d** a **e**, o diafragma volta à posição inicial. Assim, ele vibra uma só vez durante o ciclo, acompanhando fielmente as variações da corrente de sinal.

Em nossa **figura 27**, mostramos duas bobinas; isto é apenas um detalhe construtivo, que tem por finalidade aumentar a eficiência do aparelho, devido ao aproveitamento dos dois pólos - norte e sul - de cada núcleo.

Na **figura 29**, mostramos, em seu aspecto verdadeiro, um desses fones-miniatura, conhecidos como "fones de ouvido" e que são utilizados em receptores portáteis, ditos de bolso, transistorizados. O aluno observa que, devido às suas reduzidas dimensões, a bobina é de um núcleo só conforme demonstra o desenho em corte da **figura 30.**

A bobina do fone é construída com elevado número de espiras de fio bastante fino, pois ela deve ter resistência ôhmica relativamente alta, cerca de 1000 a 2000 Ω.

Os fones magnéticos podem ser usados em circuitos onde fluem ao mesmo tempo corrente alternada e contínua, desde que esta última não danifique o enrolamento.

Os fones de uso geral têm resposta de freqüência somente em torno dos sons médios, o que significa que são adequados para se ouvir voz. Existem, entretanto fones de alta-fidelidade especialmente construídos para reproduzir quase toda a faixa audível cujo aspecto físico é mostrado na **figura 31.**

b) Fone de cristal

Efeito piezoelétrico

Verificou-se que certos cristais, como o quartzo, a turmalina, cristais de La Rochelle etc., gozam da propriedade

Figura 27 - Corte do fone magnético.

Figura 29 - Fone miniatura.

Figura 31 - Fone magnético.

bastante interessante de produzir uma fraca tensão elétrica, quando submetidos a esforços mecânicos, e, inversamente produzir esforço mecânico (deformações), quando a eles se aplica uma tensão elétrica.

De fato, suponhamos que se tenha um cristal de faces planas, cortado convenientemente, conforme mostramos na **figura 32**. Se a esse cristal for aplicada uma força de compressão, nas faces de aplicação da força aparecerão cargas elétricas de sinais contrários. Se a força for de tração, as cargas serão de sinal contrário àquele provocado pela compressão. Inversamente, se aplicarmos uma tensão positiva às faces do cristal, teremos uma deformação e, se aplicarmos uma tensão negativa, observaremos deformação em sentido contrário, dessas faces.

Em resumo, isso significa que:

- A aplicação de um esforço mecânico de compressão e tração produzirá uma tensão que varia de acordo com a intensidade do esforço.

- A aplicação de sinal variável ao cristal provocará compressão ou dilatação.

Ao fenômeno acima descrito dá-se o nome de **fenômeno piezoelétrico**.

A piezoeletricidade é bastante usada em eletrônica, principalmente em osciladores, fonocaptadores e nos chamados fones de cristal, que estudaremos a seguir.

Fone de cristal

Os fones de cristal aproveitam o fenômeno piezoelétrico que acabamos de expor, para transformar os impulsos elétricos em vibrações sonoras.

Em princípio, o fone de cristal é constituído por uma lâmina de cristal (cristal de La Rochelle) disposta de maneira que se possa curvar, quando às suas faces se aplica uma corrente. Ao cristal prende-se um diafragma de fibra ou alumínio, que acompanha os movimentos de curvatura, produzindo deslocamento de ar e, conseqüentemente, som. Na **figura 33**, mostramos um esquema do princípio de funcionamento dos fones a cristal. Por ele, o aluno pode perceber que, ao aplicar-se a corrente aos topos da lâmina, ela deforma-se na direção do eixo perpendicular ao plano do cristal, ao qual está unido o diafragma. Essas deformações, como vimos, acompanham as variações de corrente e reproduzem fielmente o som.

Os fones de cristal, quanto à aparência, são iguais aos magnéticos; todavia, apresentam algumas desvantagens em relação àqueles, que são:

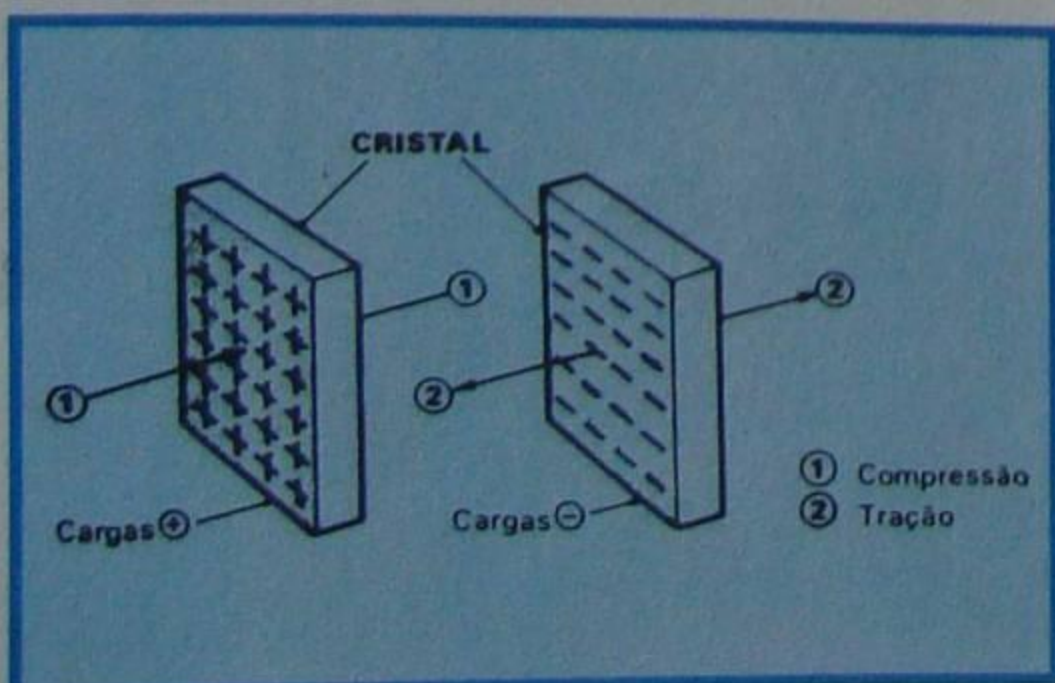



Figura 32- Exemplo para análise.

- **Fragilidade mecânica**, pois o cristal de La Rochelle é bastante quebradiço e qualquer pancada mais forte danifica o fone.

- **Sensibilidade à temparatura**. Devido ao baixo ponto de fusão do cristal (cerca de 63°C), a temperatura de trabalho do fone não deve ultrapassar 40 a 45°, caso contrário o sinal se deteriora.

Não deve **nunca** ser ligado a circuitos onde também exista componente de corrente contínua, pois esta o danificará. Conseqüentemente, quando há necessidade de ligar um fone de cristal em circuito por onde fluem simultaneamente a corrente contínua e a alternada de sinal, deve-se ligá-lo em série com um capacitor, o qual bloqueará a CC e dará passagem somente à CA.

Como vantagens do fone de cristal sobre o magnético, podemos citar: o **peso**, porque o de cristal é bem mais leve, constituindo grande vantagem para quem trabalha durante muito tempo com fones no ouvido; a **fidelidade**, pois o fone de cristal dá reprodução mais pura; **alta impedância**, sendo esta uma propriedade característica do fone de cristal. Ela é desejável, porque possibilita a ligação do fone diretamente em circuitos de alta impedância, evitando assim o uso de transformador-adaptador.

2 - Alto-falantes

O alto-falante consiste em uma bobina que emerge em um campo magnético ou eletromagnético intenso, ligado à qual se acha um diafragma, em forma de cone. Na **figura 34**, apresentamos alguns tipos de alto-falantes.

O funcionamento do alto-falante explica-se da seguinte maneira: Quando se aplica uma corrente à bobina móvel, ela cria em sua volta um campo magnético. Esse campo, no interior da bobina, tem a direção de seu eixo .

No ímã do falante, o campo tem direção perpendicular à bobina. Se for aplicada corrente alternada aos terminais da bobina, essa corrente produzirá campo magnético que interagirá com aquele do ímã permanente, fazendo com que a bobina seja atraída ou repelida, de acordo com os semiciclos da CA, provocando um movimento de vaivém. Esse movimento transmitido ao cone, produz vibrações sonoras que são captadas pelo ouvido.

É fácil compreender que, se aplicarmos à bobina uma corrente variável de acordo com a freqüência sonora, a bobina sofrerá movimentos de vaivém no mesmo ritmo. Percebe-se que o princípio de funcionamento é bastante simples, sendo este similar ao de funcionamento dos microfones dinâmicos, e qualquer pessoa medianamente hábil em trabalhos mecânicos é capaz de construir um alto-falante que funcione. Entretanto, construir um alto-falante que funcione eficientemente em todas as freqüências sonoras é uma tarefa muito difícil, o que, em parte, justifica o alto preço do componente.

Quanto ao método de obtenção do campo magnético (fluxo magnético), podem-se classificar os alto-falantes em:

a) Eletrodinâmicos

Os alto-falantes eletrodinâmicos são aqueles nos quais o campo magnético é produzido pela passagem de uma corrente contínua através de uma bobina com núcleo de ferro. Na **figura 35**, apresentamos o corte de um alto-falante eletrodinâmico, na prática designado por **falante de campo**.

Devemos esclarecer que o falante de campo foi largamente utilizado até a década de 50, decaindo a partir daí, devido ao desenvolvimento de materiais de excelentes qualidades magnéticas, tais como o "permaloy", o "alnico", "ticonal", etc., sendo seu interesse apenas de cunho didático.

A bobina que produz o campo é chamada de **bobina de campo**. Obviamente, a corrente produtora do campo deve ser contínua. Como a bobina de campo deve ter elevado número de espiras, para produzir campo magnético intenso, resulta que sua indutância é grande. Em razão disso, nos aparelhos que usavam alto-falantes eletrodinâmicos, era comum aproveitar a bobina de campo como parte da célula de filtragem de corrente contínua. Nos esquemas antigos, essa bobina era representada junto aos elementos do filtro e designada por **campo**, conforme ilustramos na **figura 36**.

Na figura 35, indicamos, entre a bobina de campo e a carcaça, outra bobina chamada **bobina de zumbido**, cuja finalidade é reduzir o zumbido da freqüência da rede que a bobina de campo induz na bobina móvel. A bobina de zumbido é plana, de poucas espiras de fio grosso, e é ligada em série com a bobina móvel, como indicamos na **figura 37**. Essa bobina não costuma ser indicada nos esquemas.

b) Dinâmico

O alto-falante **dinâmico** é aquele que usa o **ímã permanente**, para a produção do fluxo magnético; por isso, ele também é conhecido como **alto-falante de ímã permanente**. É o único tipo de alto-falante que se usa atualmente, desde os pequenos rádios transistorizados até os mais possantes sistemas de som de audição pública (em inglês, chamada de "public address") e fones de ouvido; por isso, vamos deter-nos um pouco mais em seus detalhes construtivos.

Na **figura 38**, mostramos as partes principais de um alto-falante dinâmico, que são: cone, carcaça (cesto), aranha, ímã permanente, blindagem magnética, anel centrador, bobina móvel, junta da caixa de ressonância, guarda-pó, peça polar interna

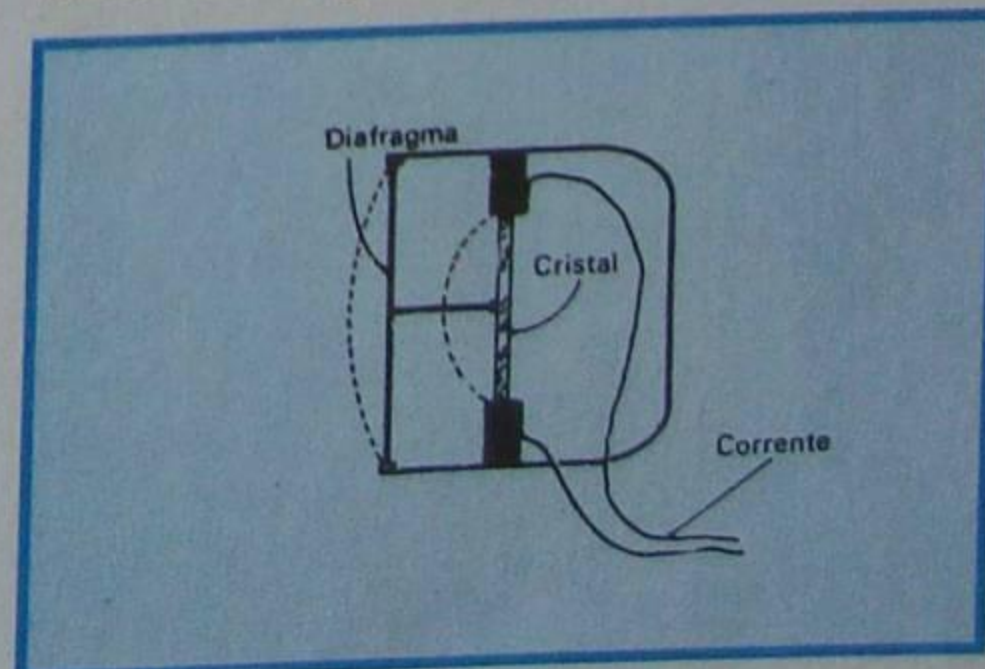



Figura 33 - Fone de cristal.

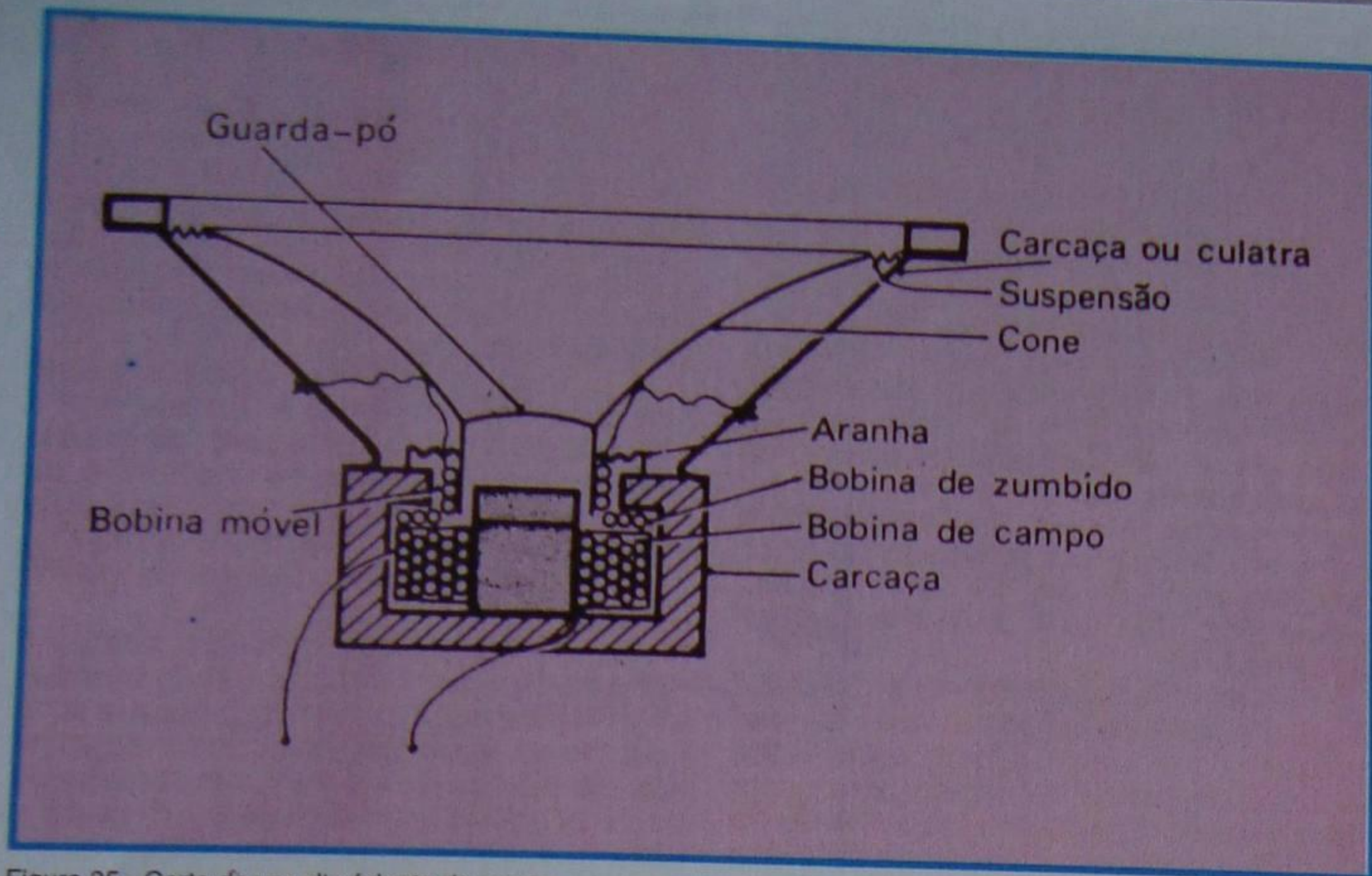



Figura 35 - Corte de um alto-falante de campo.

e placa magnética ou placa polar superior.

1) **Blindagem magnética** - É uma estrutura em forma de U ou de cilindro, cuja função é conduzir o fluxo magnético da parte inferior do ímã até as proximidades da bobina móvel.

2) **Ímã** - Como já vimos, tem por função criar, um fluxo magnético intenso. É feito de liga especial de cobre, alumínio e níquel (alnico), embora atualmente também seja feito com ferrite de Bário. Costuma ter a forma tronco-cônica, cilíndrica ou anular, conforme mostramos na **figura 39**.

Figura 34 - Alto-falantes.

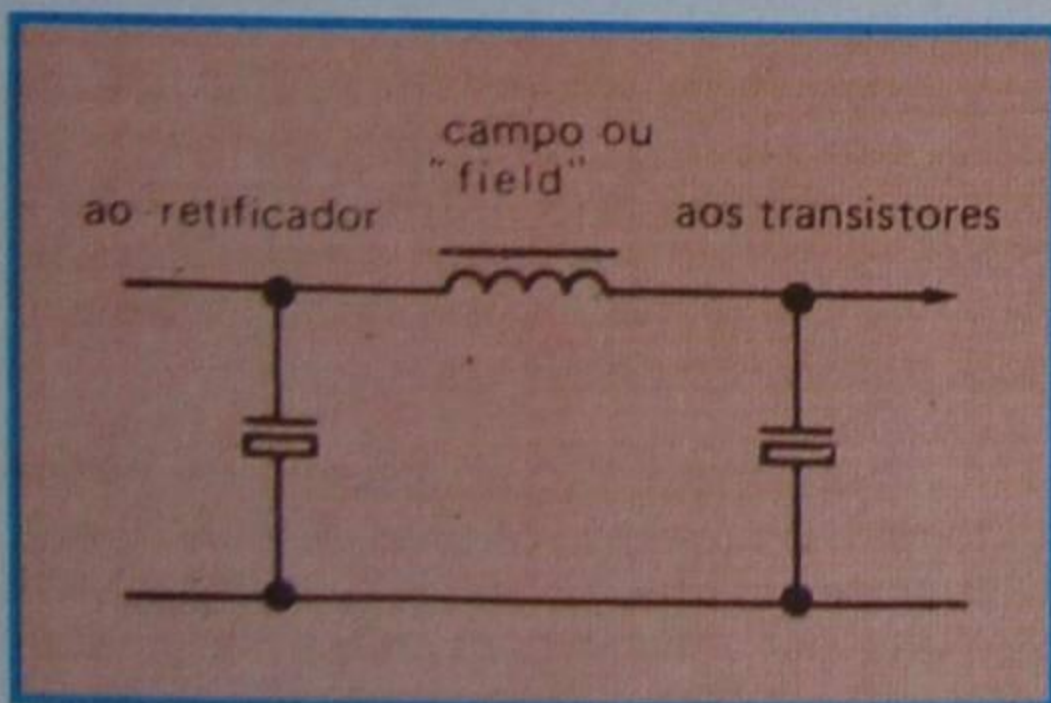



Figura 36 - Conexão da bobina de campo.

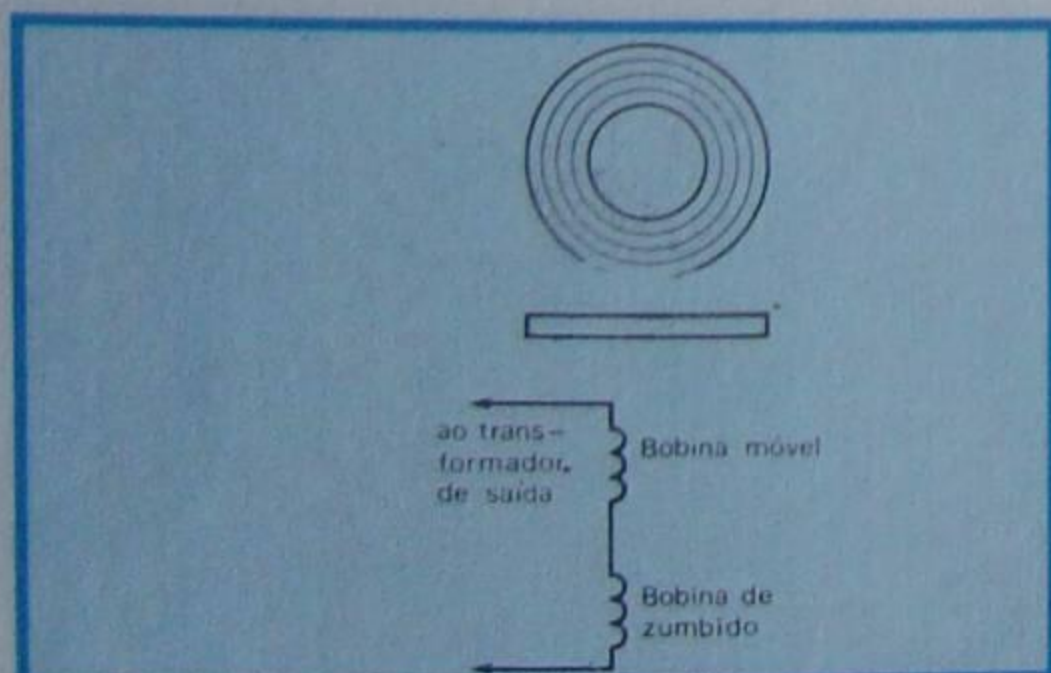



Figura 37- Ligação da bobina de zumbido.

3) **Peça polar interna** - Como o nome indica, serve como poló magnético interno à bobina móvel.

É construída de aço especial que concentra as linhas de força ou campo magnético, para aumentar sua eficiência. Tem formato especial de cilindro, com base alargada, para permitir o apoio do anel centrador.

4) **Anel centrador** - É uma peça de material não magnético, desempenhando três funções:

- Permite centrar a peça polar interna no orifício da placa superior.
- Evita a entrada de poeira e, principalmente, de limalhas de ferro no entreferro (espaço entre os pólos do ímã, onde se aloja a bobina móvel).
- Serve para manter o ímã permanente em sua posição, através da pressão que ele, anel, exerce entre a blindagem magnética e a peça polar interna.

5) **Placa polar superior** - Feita de material de grande permeabilidade magnética, serve para concentrar o fluxo magnético da blindagem em volta do entreferro.

Figura 39 - Formas de ímãs.

Obs.: conforme o processo construtivo do alto-falante há diferenças físicas no anel centrador, peça polar interna, peça polar superior, conjunto este que passa a ser denominado **conjunto magnético**. Para estes casos, o ímã permanente possui o formato anular.

6) **Carcaça** - Sua finalidade é suportar o cone. É construída de chapa de ferro tratado e tem, geralmente, a forma de cesto, embora possa variar, de acordo com a forma do cone. Possui aberturas, para não dificultar (carga acústica) o movimento do cone. Essas aberturas exercem muita influência na resposta de freqüência do alto-falante.

Na **figura 40** é mostrado um exemplo de carcaça, na qual foi instalado o conjunto magnético. Saiba o aluno que o conjunto, após fixado, recebe uma proteção plástica.

7) **Bobina móvel** - É construída sobre uma fôrma de papelão impregnado, fibra ou alumínio, tal qual a mostrada na **figura 41.** Essa fôrma deve ser de grande precisão. O enrolamento é feito com poucas espiras de fio, cuja espessura depende da corrente que passará por ela e da impedância.

A bobina, após construída, é impregnada de verniz especial, que a torna resistente à umidade, ao calor e, principalmente, para que o enrolamento não se desfaça com o movimento a que ela estará submetida. Sua ligação com o

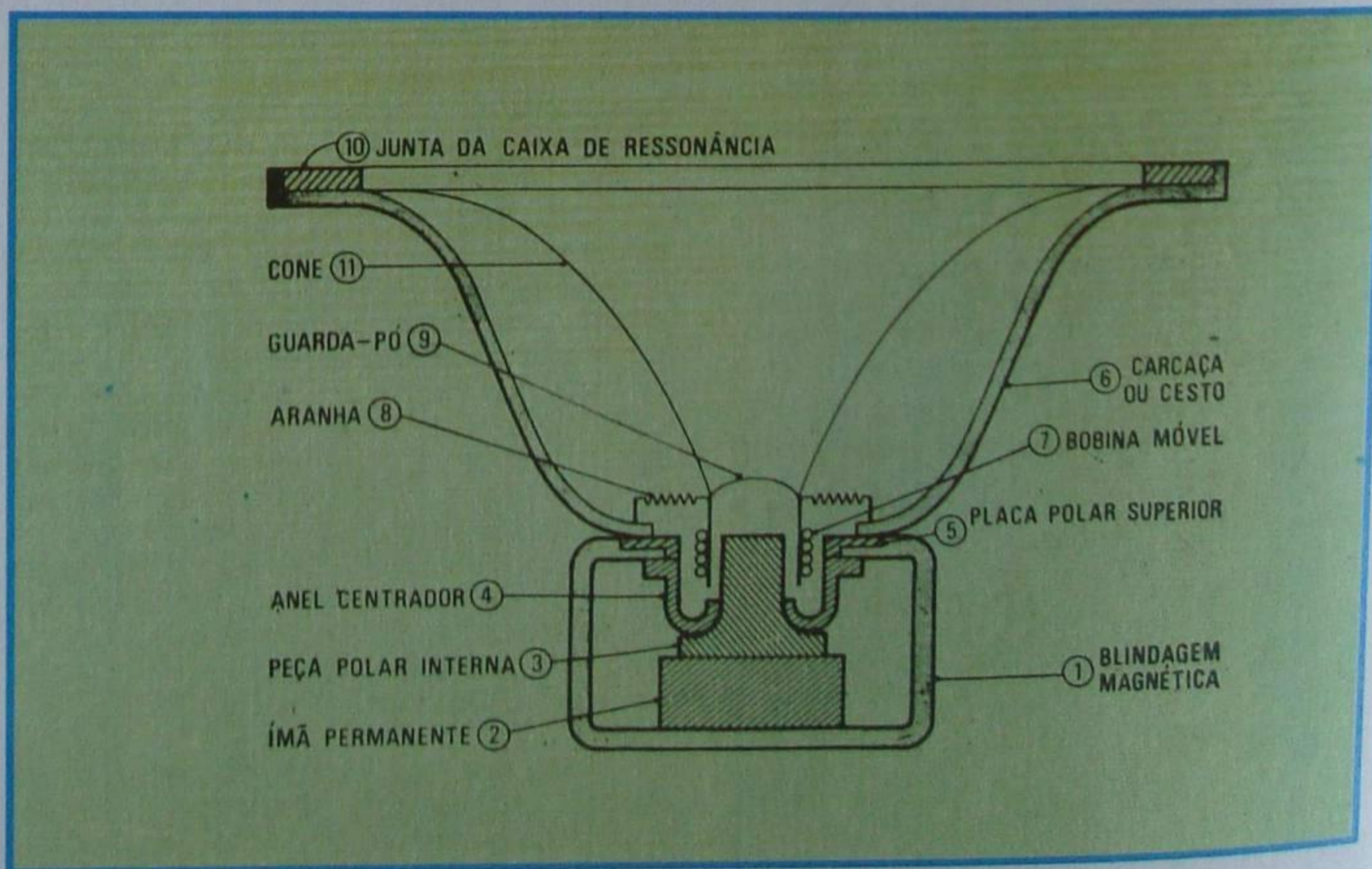



Figura 38 - Partes principais de um alto-falante dinâmico.

Figura 40 - Exemplo de carcaça.

circuito externo é feita através de cabinho de grande flexibilidade e de tamanho suficiente, para não impedir sua movimentação.

O posicionamento da bobina móvel é uma tarefa bastante delicada, porque ela deve ficar perfeitamente centrada dentro de um entreferro, o qual deve ser o menor possível, para que não haja perdas magnéticas. Da posição da bobina vai depender, em grande parte, a eficiência do alto-falante.

8) **Aranha** - É o nome que se dá a suspensão do cone que pode ser vista na **figura 42**. Trata-se de uma membrana corrugada, que tem a forma de um disco ou de um sino. Tem duas finalidades importantes:

- Manter a bobina móvel na posição correta no entreferro.
- Evitar a entrada de poeira e partículas de ferro no interior do entreferro.

A aranha é construída por uma tela de material fibroso, impregnado de verniz especial e é presa ao cone pelo lado de fora e fixada à estrutura por cola especial. Na **figura 43**, apresentamos a fixação da aranha.

9) **Guarda-pó** - Trata-se de uma cobertura de tela fina, alumínio, papelão ou feltro, que tem forma plana ou côncava, conforme a mostrada na **figura 44**. Sua finalidade é evitar a entrada de pó, partículas de ferro ou qualquer outra impureza no interior do entreferro.

Devemos lembrar que a distância entre a bobina móvel e as paredes das peças polares é extremamente pequena. Portanto, a entrada de corpos estranhos, principalmente de limalha de ferro, que é atraída pelo ímã, provocará o atrito da bobina móvel, produzindo o som de "taquara rachada" e danificando a bobina. Devido ao campo magnético intenso no entreferro, quando aí penetra limalha, ela dificilmente sai, e o alto-falante fica inutilizado. Por isso, quando o aluno manusear um alto-falante, mesmo que seu guarda-pó esteja perfeito, deverá tomar o máximo cuidado, evitando colocá-lo em

Figura 41 - Bobina móvel.

Figura 42 - Aranha.

local sujo de pó e de limalhas de ferro. Quando o alto-falante ficar muito tempo sobre a bancada, é conveniente protegê-lo com uma cobertura de pano.

10) **Junta da caixa de ressonância** - Trata-se de um anel, geralmente de papelão, que serve para apoiar o alto-falante no "baffle" ou caixa-acústica.

11) **Cone** - Finalmente, temos o cone, que é um diafragma de material fibroso, principalmente papelão especial, daí advindo o nome de cone de papel. Os primeiros diafragmas tinham realmente a forma de cone e, embora atualmente essa forma tenha sofrido modificação, visando aprimorar a resposta de freqüência do alto-falante, conserva-se ainda a denominação de cone. Na **figura 45**, mostramos um exemplo de cone, enquanto que, na **figura 46,** o aluno observa desenhos de distintas formas de cones. Em **a** temos o cone normal, que é encontrado na maioria dos alto-falantes, principalmente os de baixo custo. Em **b**, temos o cone curvilíneo ou exponencial, desenvolvido para melhor reprodução de uma larga faixa das freqüências de áudio, embora sua eficiência nas freqüências mais baixas seja inferior a do tipo normal (a). Em **c**, mostramos o cone plano, cujas propri-edades são semelhantes às do tipo **b**. O cone do tipo plano também é muito usado nos pequenos alto-falantes de rádios portáteis, mas aqui o que se visa não é a resposta de freqüência e, sim, a economia de espaço. Finalmente, em **d** mostramos o cone elíptico (ou oval).

O tamanho do alto-falante é indicado pelas dimensões de seu cone. No caso dos alto-falantes de cone do tipo normal, exponencial e plano, indica-se a dimensão do diâmetro da base maior do cone. Assim, diz-se falante de 7,5 cm (3"), 10 cm (4"), 15 cm (6"), 20 cm (8"), 25 cm (10"), 30 cm (12") e 37,5 cm (15"), que são os tamanhos padronizados. Para os alto-falantes ovais, indicam-se as dimensões dos eixos da elipse. Assim, diz-se: falante de 10 x 15 cm - lê-se: 10 por 15 - (4 x 6");

Figura 43 - Fixação da aranha.

Figura 44 - Guarda-pó.

Figura 45 - Exemplo de cone.

15 x 22,5 (6 x 9"); etc.

Em um alto-falante ideal, o cone deveria movimentar-se livremente no ar, conforme mostramos na **figura 47**. Isto não é possível, na prática. Então, fixa-se o cone à carcaça, através de uma união flexível chamada de **suspensão do cone** (**figura 48**).

A suspensão, nos alto-falantes de menor custo, é moldada no próprio cone de papel. Quando o alto-falante é de melhor qualidade, faz-se um adelgaçamento (desbaste) do papel do cone, na parte correspondente à suspensão. Isto torna o cone mais flexível. Na construção de alto-falantes de superior qualidade, principalmente para uso em reprodutores de alta-fidelidade, costuma-se fazer a suspensão com uma tira de couro macio (pele de porco), camurça ou feltro especial.

Quanto mais macia for a suspen-

Figura 46 - Formas de cones.

Figura 47 - Alto-falante ideal.

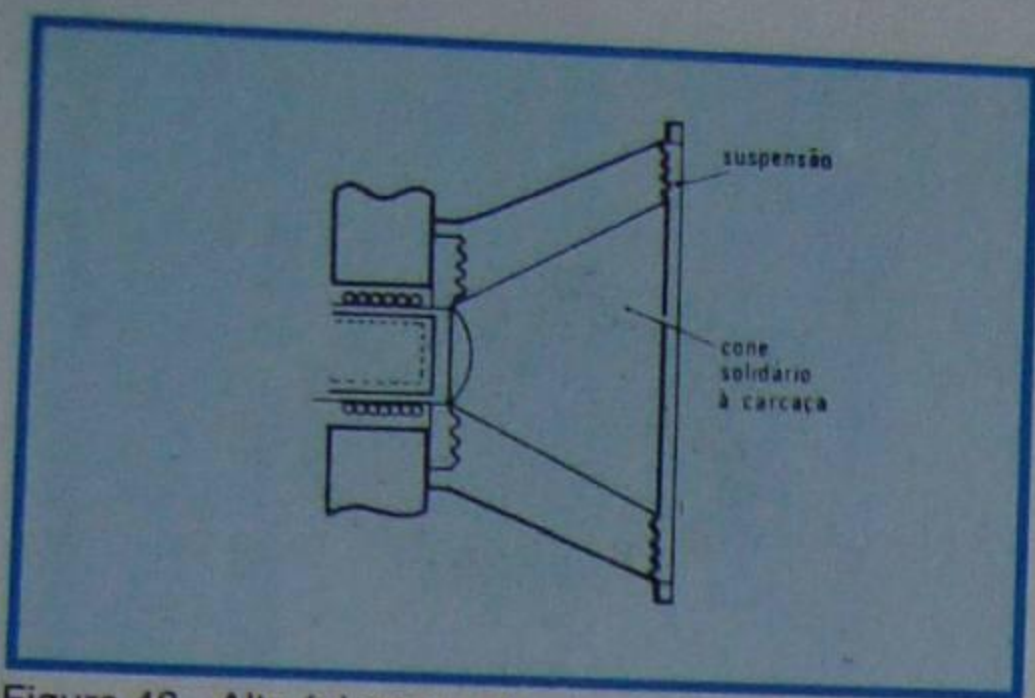



Figura 48 - Alto-falante real.

são, melhor será a reprodução dos graves (freqüências baixas).

A suspensão, além do efeito citado, serve também para evitar que o cone sofra flexão (se entorte) e produza deformação do som. Em outras palavras, a suspensão permite que o cone se mova sempre na direção do seu eixo.

Na **figura 49**, mostramos um falante em vista explodida, para que o aluno observe os detalhes.

3 - Algumas considerações sobre a construção do alto-falante

Como frisamos no início do capítulo anterior, aparentemente o alto-falante é de fácil construção. Entretanto, para que ele seja realmente eficaz e reproduza com boa fidelidade toda a gama de sons audíveis, são necessários cuidados especiais, nos mínimos detalhes, o que requer grande experiência e conhecimentos técnicos da parte do fabricante. Realmente, vimos que:

1º) A forma da carcaça, incluindo suas aberturas, influi no alcance de freqüência, porque ela, carcaça, por si só, constitui uma caixa acústica que irá "carregar" o cone.

2º) O entreferro deve ser exatamente dimensionado, para que permita que a bobina móvel se movimente livremente e para que sejam reduzidas as perdas de fluxo magnético.

3º) A bobina móvel deve ser cuidadosamente construída, a partir da fôrma, que deve ser perfeitamente circular e indeformável. O peso da bobina móvel deve ser reduzido, para que uma considerável parte da energia não seja empregada somente com a finalidade de vencer a dificuldade oposta pelo seu peso.

4º) A aranha, aparentemente simples, também requer cuidados especiais. De fato, se ela for muito flexível, permitirá que o cone se deforme nas passagens sonoras de grande amplitude (freqüências baixas). Por outro lado, se for demasiadamente rígida, provoca a reprodução não linear dos sons graves.

5º) O cone apresenta uma série de problemas, que já citamos, ou seja, deve ser leve, ter suspensão rigorosamente estudada, formas especiais para o alcance de freqüência desejado, etc.

6º) O ímã permanente deve ser de campo magnético intenso e constante.

Neste ponto, vale dizer que na prática se costuma classificar o alto-falante também pelo peso de seu ímã, podendo ser **leve, meio pesado** e **pesado**.

A eficiência de um alto-falante depende do seu ímã, ou seja, do fluxo magnético, bem como das dimensões do entreferro. Por **eficiência** devemos entender a relação entre a potência elétrica que se aplica ao alto-falante e a potência sonora que ele produz. Essa eficiência é muito baixa, cerca de 3%, mas pode ser aumentada, introduzindo-se o falante em gabinetes especiais, denominados **caixas-acústicas** ou **sonofletores**, de que trataremos na lição prática.

A potência elétrica que se pode aplicar ao alto-falante depende de vários fatores, principalmente do tamanho do cone, do "peso" do ímã e da bobina móvel empregada.

Geralmente, os falantes pesados são os mais eficientes, daí resultando que algumas vezes a substituição de um alto-falante leve, por um pesado, produz efeito semelhante à duplicação da potência de saída do amplificador.

7º) Devido a todas essas considerações, o aluno pode concluir que não apenas construir, mas também **reparar** um alto-falante, é tarefa que exige especialização. Portanto, quando deparar com alto-falante danificado, seja pela interrupção da bobina móvel, seja devido à existência de limalha (pó de ferro) no entreferro, ou cone rasgado, etc., somente tente consertá-lo se não houver outra alternativa. Caso contrário, substitua-o ou leve-o a uma oficina especializada.

4 - Alto-falantes especiais

Expusemos, no parágrafo anterior, os fatores que limitam a resposta de freqüência dos alto-falantes. Até o aparecimento das gravações em alta-fidelidade, as deficiências dos alto-falantes não eram muito sentidas, porque o alcance que se desejava era de uns 100 até cerca de 8 000 Hz, e essa faixa era coberta por qualquer alto-falante de mediana qualidade. Com a evolução das gravações, passaram-se a exigir sistemas capazes de reproduzir em ampla faixa, ou seja, desde uns 16 até cerca de 16 000 Hz. Então, houve necessidade de aprimorar os amplificadores, e, particularmente, os alto-falantes. Surgiram, então, os alto-falantes especiais para alta-fidelidade e toda uma nomenclatura que passou a ser incorporada ao linguajar técnico. Assim, encontramos:

a) **Alto-falante de graves** ou **"woofer"** (lê-se: "uôfer"), geralmente de grande diâmetro, de 20 a 37,5 cm, cuja finalidade é reproduzir os sons graves, isto é, os de freqüência baixa. O "woofer" de boa qualidade reproduz sons de 20 até cerca de 4 000 Hz. São robustos, de ímã de grande densidade e têm aspecto semelhante ao alto-falante comum. Na **figura 50**, mostramos um "woofer", enquanto que, na **figura 51**, o mesmo woofer pode ser visto por trás para observação de detalhe de sua peça polar.

b) **Alto-falante de médios** ou **"squawker"** (lê-se: "escuóquer"), que tem a finalidade de reproduzir os sons entre 120 a 6000 Hz, que são os sons médios da faixa audível. Também têm aspecto comum, ímã de grande eficiência e construção sólida, como o aluno pode observar pela **figura 52**. Este tipo de alto-falante é mais conhecido pela denominação de **"mid-range"**.

c) **Alto-falante de agudos** ou **"tweeter"** (lê-se: "tuíter"), normalmente de pequeno tamanho, ou acoplado a uma corneta, e que tem por função reproduzir sons altos (agudos) da faixa de áudio. Seu alcance de freqüência está, normalmente, entre 3 000 a 16 000 Hz. Seu cone é rígido, às vezes de plástico, o que exige densidade de fluxo (ímã) mais elevada que o "woofer" ou "squawker". Na **figura 53**, mostramos um "tweeter" dos mais comuns, do tipo corneta. É claro que há tipos diferentes, como o mostrado na **figura 54**. Apenas a título de comentário, citamos que há tweeters especiais, construídos de material piezoelétrico, vulgarmente chamados de **"tweeter piezo"**. Quanto ao aspecto físico dos mesmos, o mais comum é do tipo corneta.

d) **Alto-falante de alcance completo** ou **"full-range"** (lê-se: "fulrange") que, como o nome indica, é um alto-falante destinado a reproduzir todas as freqüências da faixa de áudio. Vimos que, com um só cone, dificilmente se conseguem reproduzir todas as freqüências; portanto, é comum o alto-falante de alcance completo ser formado por duas, excepcionalmente três, unidades distintas, presas na mesma armação, onde uma é um "woofer" e outra, um "tweeter". Assim, o "woofer" responde a freqüências baixas e médias e o "tweeter" às freqüências médias e altas. Na **figura 55**, mostramos um falante "full-range", onde o aluno pode notar claramente a existência do "tweeter" fixo ao "woofer".

Em verdade, também há alto-falantes de alcance completo, que têm, aparentemente, um só cone. Sua construção é especial, apresentando corrugações flexíveis (suspensão) entre o ápice (vértice do cone) e a suspensão externa. Com essa construção, nas freqüências baixas vibra o cone todo e, nas altas, somente a parte do cone entre o ápice e as corrugações. Na **figura 56**, mostramos um corte desse tipo de cone. Como afirmamos, só na aparência é que se tem um cone, porque, no funcionamento, são dois.

Esclarecemos que o "full-range" está caindo em desuso, devido ao advento dos "coaxiais" e "triaxiais", falantes próprios para fins automotivos e que, por esse motivo, serão vistos em momento oportuno.

Cornetas

Quando se deseja bastante volume sonoro e boa reprodução dos sons médios, para perfeita compreensibilidade da palavra falada, como nos sistemas de audição pública ("public address") usados em comícios, área aberta, propaganda de rua, etc., usam-se os alto-falantes do tipo **corneta**.

Na realidade, a **corneta** não é um alto-falante, mas um sonofletor, ou seja, caixa acústica, à qual está acoplado um

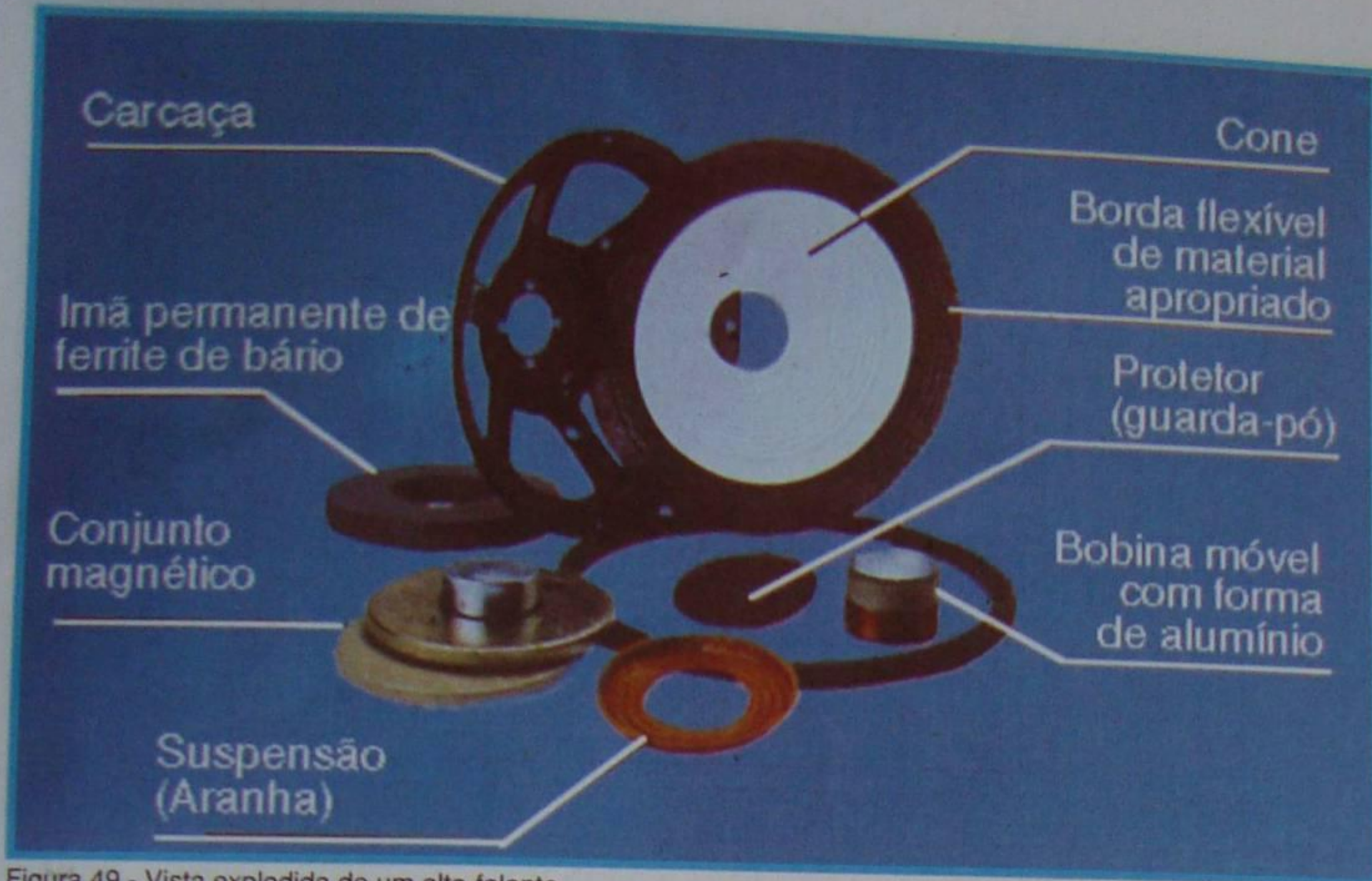



Figura 49 - Vista explodida de um alto-falante.

Figura 50 - Woofer.

Figura 52 - Mid-range.

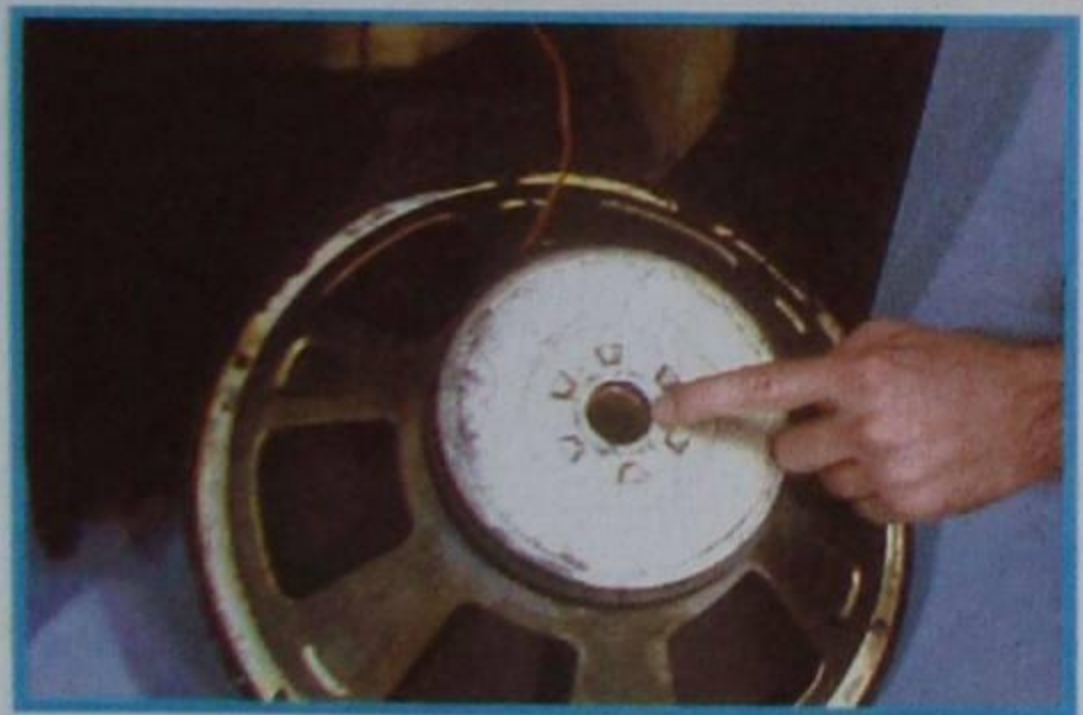



Figura 51 - Detalhe de peça polar.

Figura53 - Tweeter tipo corneta.

alto-falante. Com isso, consegue-se aumentar a eficiência sonora.

Na **figura 57**, mostramos uma corneta excitada por um alto-falante de cone de papel. Em **A**, mostramo-la fechada e, em **B**, aberta, onde o aluno distingue o alto-falante, a corneta e a capa de fechamento.

Na **figura 58**, mostramos uma corneta que usa uma unidade excitadora dispondo de diafragma de pequeno diâmetro.

A eficiência de uma corneta depende fundamentalmente de seu comprimento. Para evitar cornetas muito grandes, foram desenvolvidos tipos especiais como a **corneta dobrada** e a de **dupla dobra**, que mostramos nas **figuras 59** e **60.**

Como se pode observar na figura 59, o percurso do som praticamente é maior do que em uma corneta normal, embora suas dimensões sejam menores

5 - Sistema de alto-falantes

Vimos, linhas atrás, que, quando se deseja reproduzir com fidelidade todos os sons audíveis, deve-se utilizar dois ou mais alto-falantes, para que cada um, de per si, reproduza a faixa de som para a qual foi construído. A ligação de um conjunto de alto-falantes é o que se chama de **sistema de alto-falantes**. É comum a montagem de um sistema de 3 alto-falantes, ou seja, "woofer", "squawker" e "tweeter", para cobrir toda a faixa audível. Esses três alto-falantes são ligados à saída do amplificador. Mas, os três alto-falantes não podem ser ligados diretamente na saída do amplificador, porque aí existem as tensões correspondentes a todas as freqüências e aquelas correspondentes aos sons baixos são de grande amplitude; portanto, danificariam os reprodutores de médias e altas freqüências. Para evitar isso, os falantes são ligados através de uma unidade adaptadora, chamada de divisor de freqüências ou "cross-over" (lê-se: "cróssover"). Como o nome indica, esse dispositivo reparte as freqüências, entregando os sons graves ao "woofer"; os médios ao "squawker"; e os altos ao "tweeter". O divisor de freqüência é formado por uma rede de filtro composta de indutâncias e capacitâncias, calculadas de acordo com a freqüência.

Na **figura 61**, mostramos o desenho esquemático do mais simples divisor de freqüência. Como o aluno observa, temos dois alto-falantes: um "woofer" e um "tweeter". Devemos evitar que os sons graves passem para o "tweeter". Para isso, basta ligar em série com o "tweeter" um capacitor **não polarizado**. Como o aluno sabe, os capacitores oferecem maior dificuldade à passagem das correntes de baixa freqüência, assim, escolhendo-se a capacitância conveniente,

Figura 54 - Tweeter.

Figura 55 - Full-range.

Figura 56 - Corte do cone.

Figura 57 - Corneta.

Figura 58 - Corneta com unidade exitadora.

elimina-se, ou melhor, atenua-se a corrente de freqüência baixa. Para determinar o valor do capacitor, basta saber a impedância do "tweeter" (4 a 16 Ω) e a freqüência em que ele deve começar a reproduzir.

No divisor de freqüência, uma característica muito importante é a chamada **freqüência de transição**, definida como sendo a freqüência em que os alto-falantes são excitados com a mesma potência. De fato, suponha o aluno que no esquema da figura 61 deva ser ligado um "woofer", cuja freqüência máxima é de 6 000 Hz e um "tweeter", cuja freqüência mínima é de 3 000 Hz. Se escolhermos um capacitor que deixe passar as freqüências somente acima de 7 000 Hz, então, entre 6 000 e 7 000 Hz há uma "zona de silêncio", e perdemos os sons nela contidos. Por outro lado, se escolhermos o capacitor de maneira que o "tweeter" passe a reproduzir a partir dos 3 000 Hz, os sons entre 3 000 e 6000 Hz serão reproduzidos tanto pelo "woofer" como pelo "tweeter", com acentuação dos sons médios, o que é desagradável. É fácil compreender que entre os 3 000 e os 6000 Hz existe uma freqüência em que a potência reproduzida pelos alto-falantes é igual e a partir da qual a potência do "woofer" cai, enquanto a do "tweeter" aumenta. Essa freqüência é a chamada **freqüência de transição**. No exemplo citado, é necessário escolher a freqüência de transição próxima aos 4 500 Hz.

Na **figura 62**, apresentamos outro tipo de divisor de freqüência para dois alto-falantes, em que se emprega um indutor, para evitar que as freqüências altas atinjam o reprodutor de graves ("woofer"). Note o aluno que as freqüências altas não estragam o "woofer", ao contrário das baixas, que danificam o "tweeter", mas são por ele absorvidas, perdendo-se potências; por isso, devemos evitar que elas atinjam o "woofer". Na figura 62, mostramos uma disposição em série e, na **figura 63**, em paralelo.

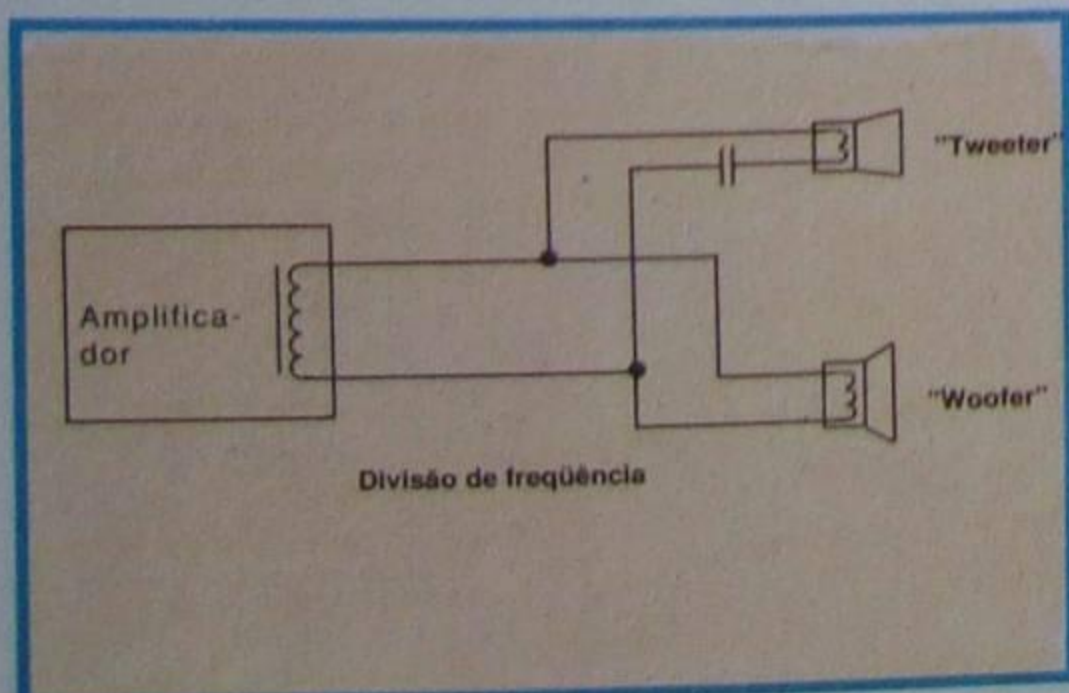



Figura 61- Simples divisor.

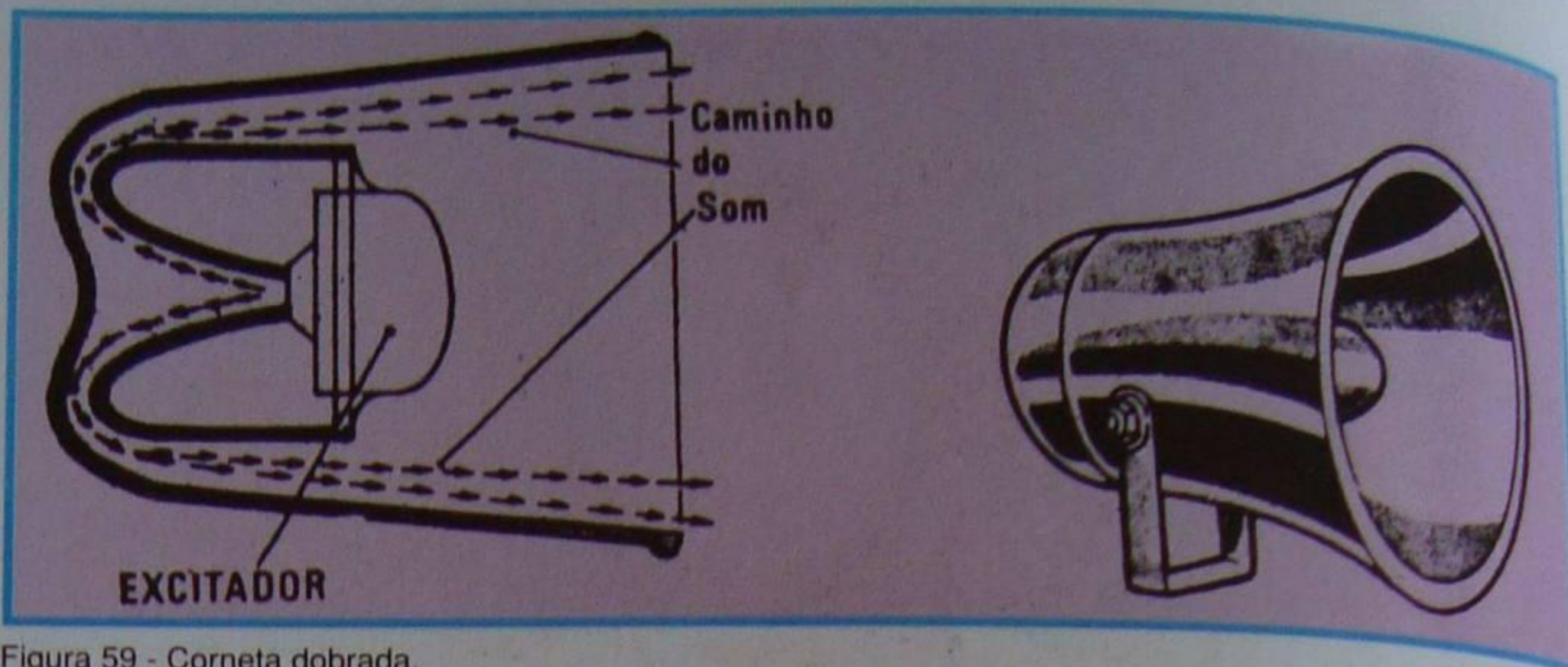



Figura 59 - Corneta dobrada.

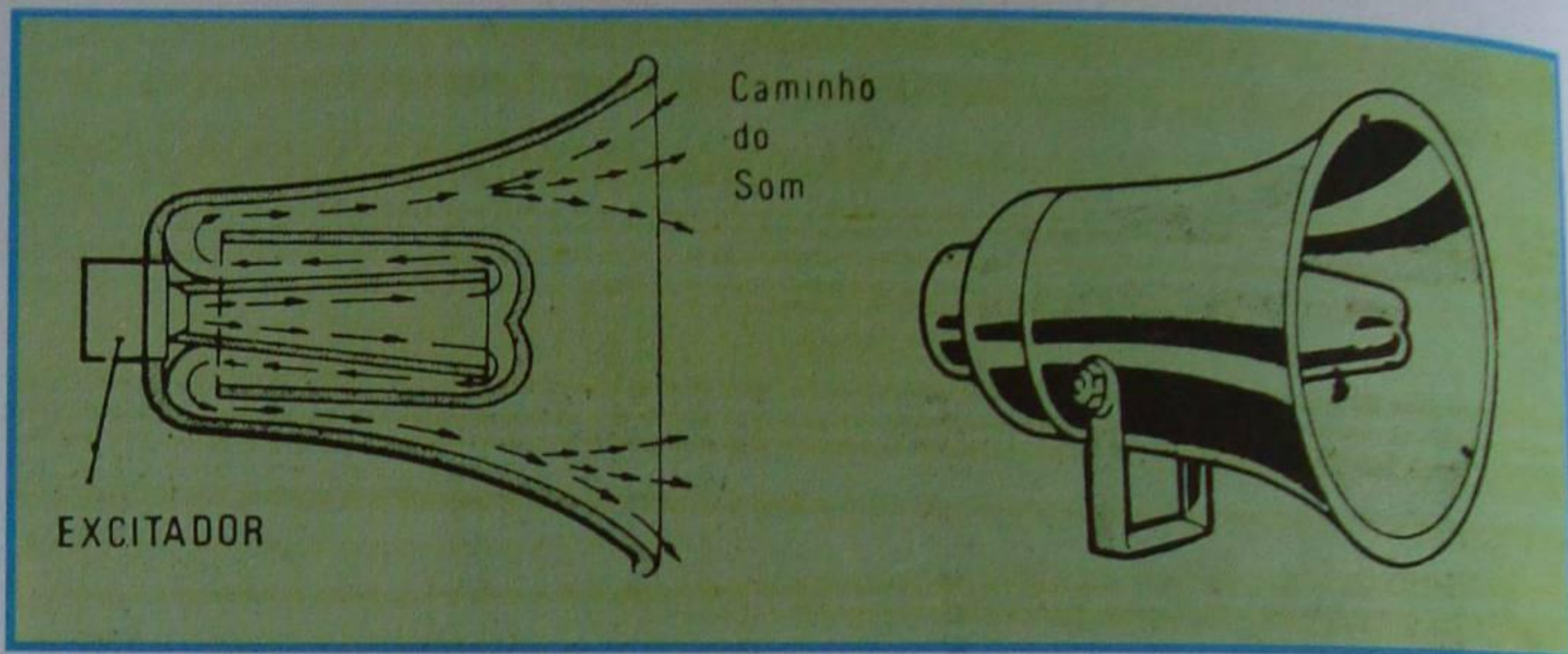



Figura 60 - Corneta de dupla dobra.

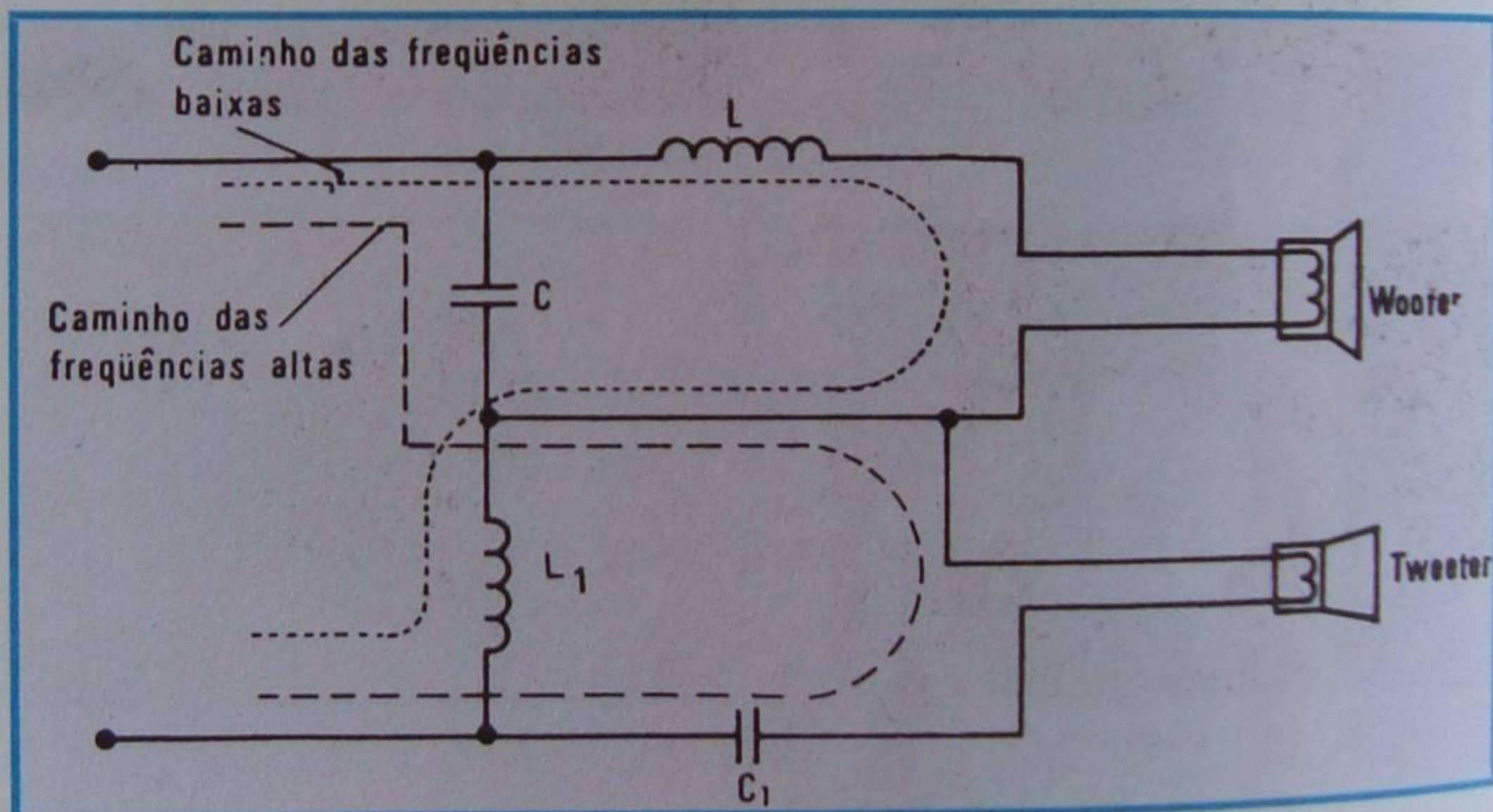



Figura 62 - Divisor de freqüência de 2 canais.

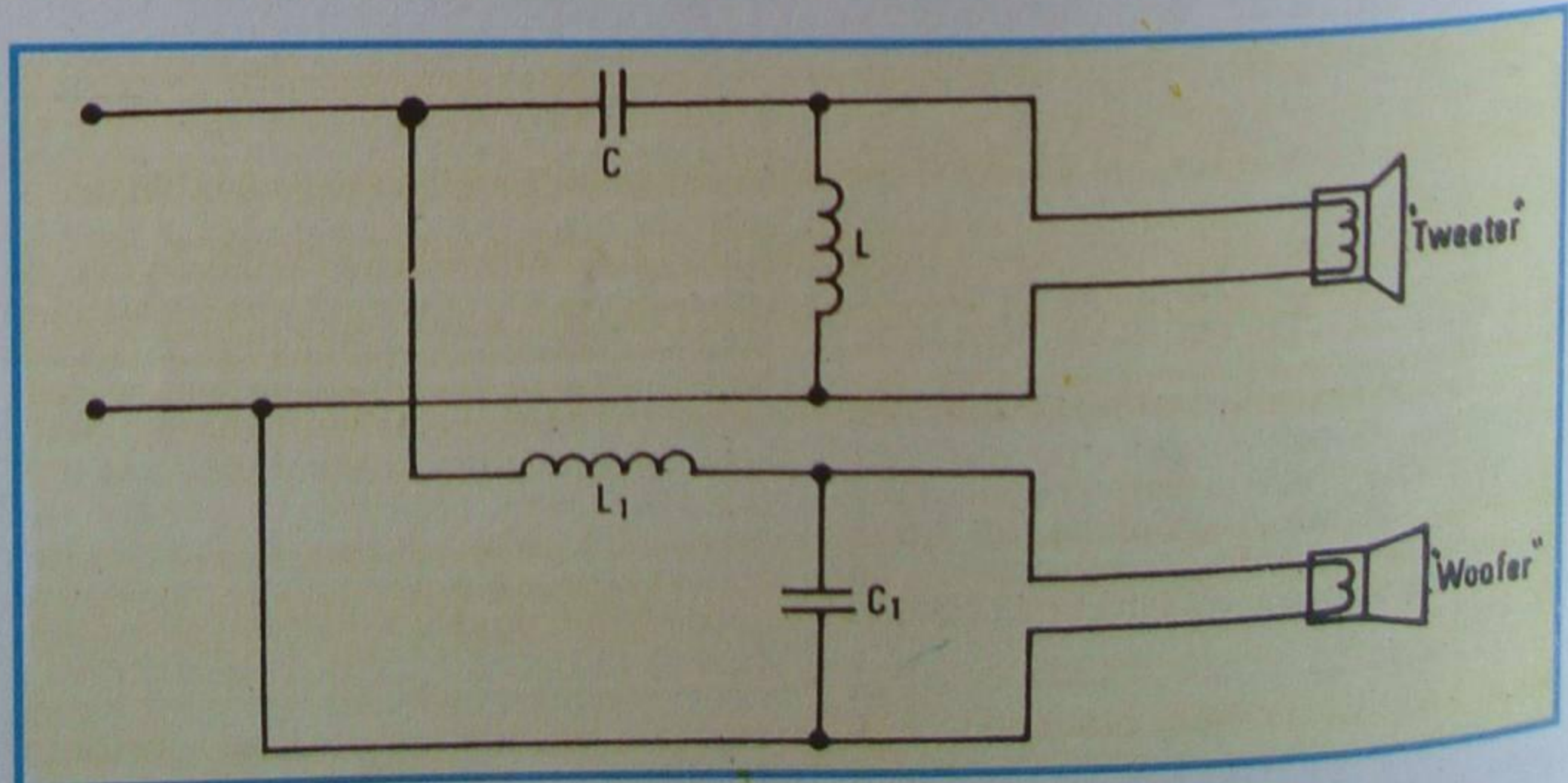



Figura 63 - Divisor de 2 canais.

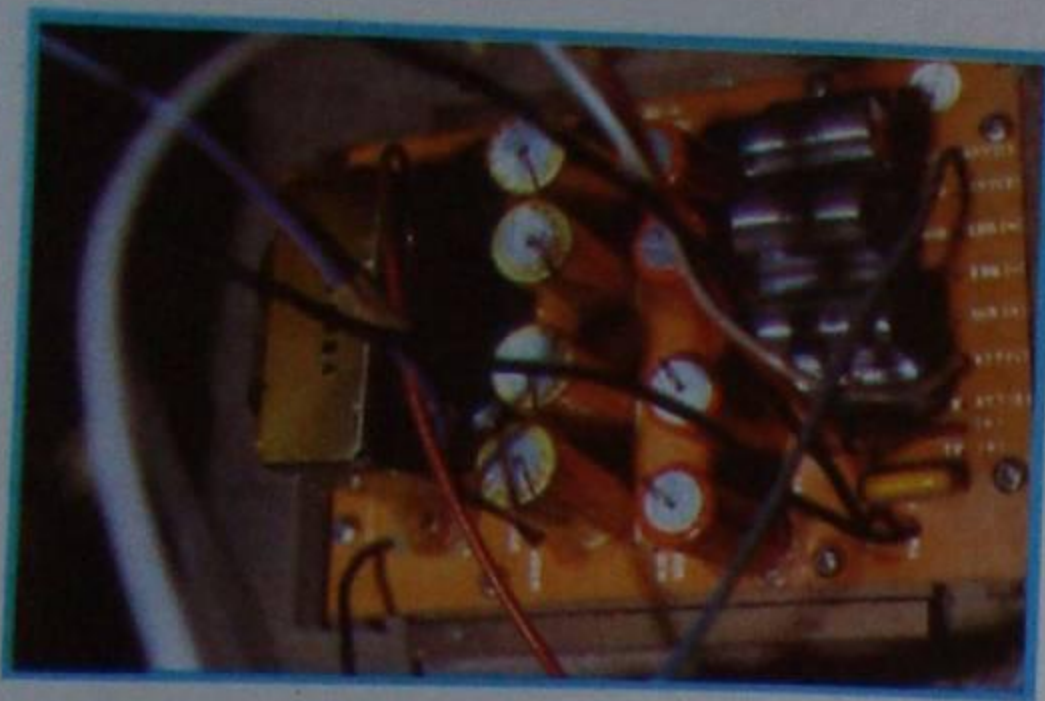



Figura 64 - Divisor de 3 canais.

Mostramos divisores de freqüência para dois alto-falantes; entretanto, é possível construí-los para três ou mais falantes, através da escolha conveniente dos valores de L e C adequados aos alto-falantes usados.

Como exemplo, mostramos, na **figura 64**, um exemplo de divisor de freqüência comercial para três faixas de freqüências.

Finalmente, devemos dizer que na construção de um divisor de freqüência não se devem utilizar capacitores polarizados porque, como o aluno sabe, esses componentes não podem ser usados em corrente alternada. Quanto aos indutores, deverão ser de núcleo de ar, para evitar as perdas devidas a freqüência alta, que ocorrem no ferrossilício usado nos transformadores para 60 Hz. É possível usar ferromagnético especial para RF, como o ferrite, ferroxcube, etc.

6 - Associação de alto-falantes

Quando se deseja fazer uma instalação eletroacústica em recintos de grandes dimensões, como salões, igrejas, clubes, etc., não se deve colocar um único alto-falante, mas grande número deles, distribuídos de maneira conveniente, para que todos os pontos do recinto tenham a mesma intensidade sonora.

Esses alto-falantes serão ligados ao amplificador. Para que a transferência de energia do amplificador aos falantes seja máxima, o aluno sabe que a impedância de saída do amplificador deverá ser igual a dos alto-falantes. Os amplificadores comuns têm impedâncias padronizadas de 4,8 e 16 Ω, e os alto-falantes também; logo, para usar mais de um falante, é necessário associar suas impedâncias, de modo que a resultante seja igual a do amplificador. A associação pode ser feita em paralelo, em série e mista. Na **figura 65**, mostramos a associação de 4 falantes de 4 Ω em série, para ser ligada à saída de um amplificador de 16 Ω. Na **figura 66**, mostramos a associação em paralelo de 4 falantes de 6 que é equivalente a 4 Ω, como o aluno pode facilmente calcular pela fómula de associação em paralelo de resistências, que apresentamos noutra parte do curso.

Finalmente, na **figura 67**, mostramos a associação mista de 4 alto-

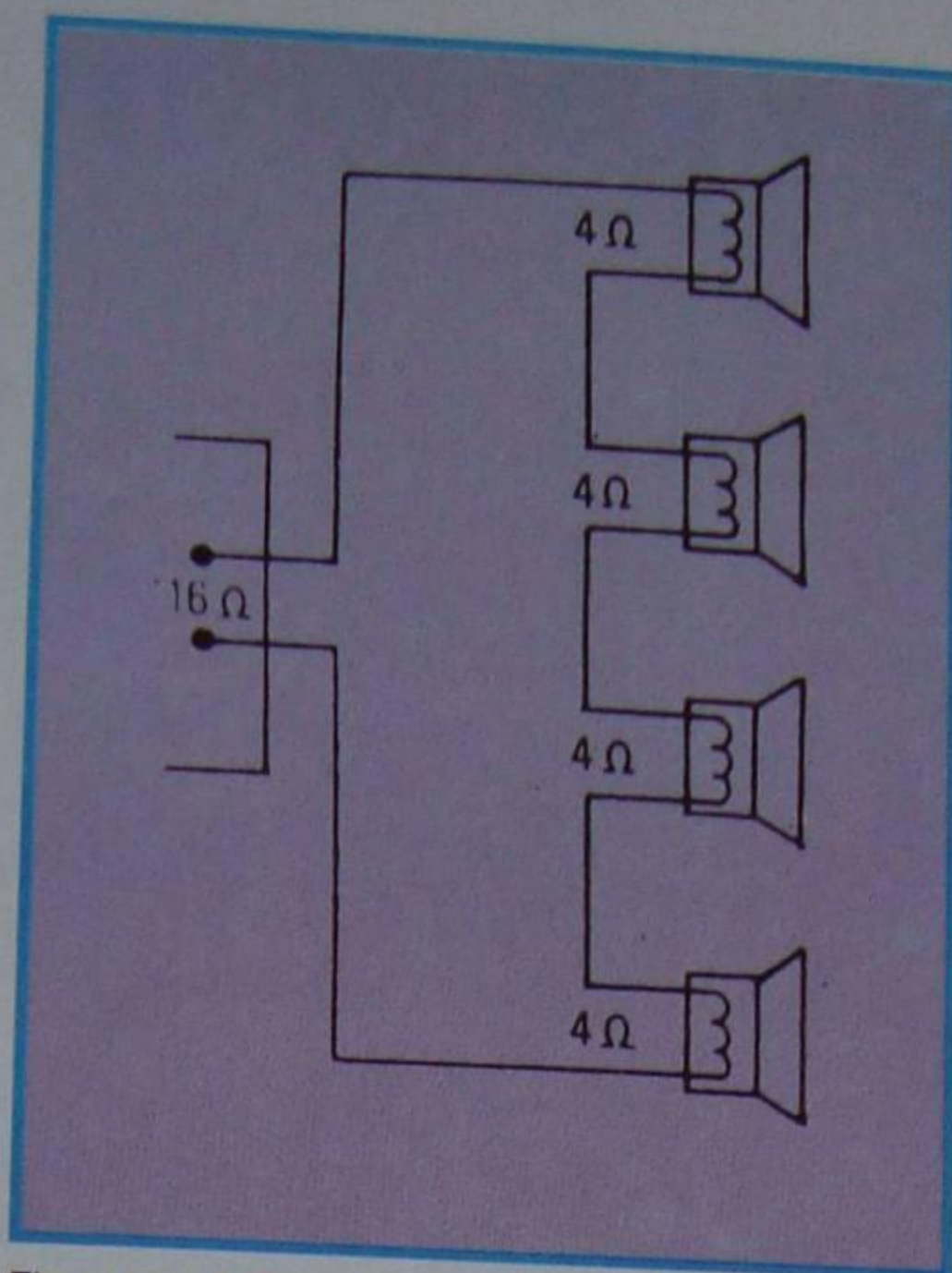



Figura 65 - Associação série.

falantes de 4 Ω ligados 2 a 2, em serie. A impedância resultante é de 4Ω, como o aluno pode facilmente calcular.

Quando a instalação requer elevado número de alto-falantes, é muito difícil associá-los de modo a se conseguir impedância equivalente com um dos

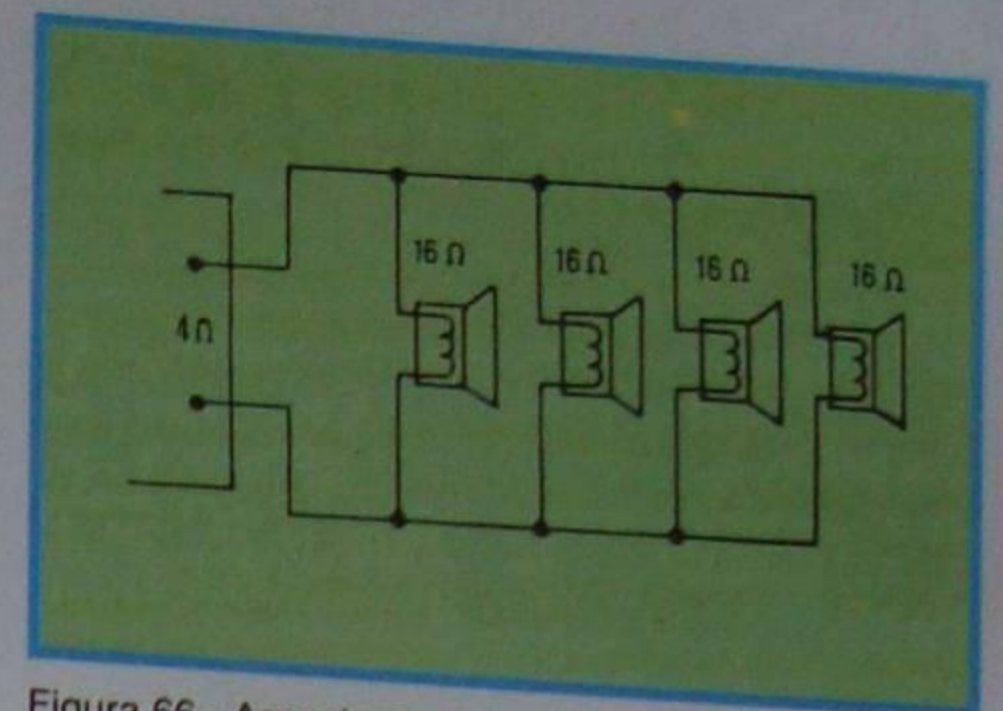



Figura 66 - Associação paralela.

valores convencionados de 4, 8 ou 16 Ω. Então, é necessario que o amplificador tenha saídas de várias impedâncias ou que se use um transformador-adaptador de impedâncias. Na **figura 68**, ilustramos uma situação em que a associação de falantes resultou em 128 Ω.

Ao encerrar esta lição teórica, queremos alertar o aluno de que os alto-falantes são instalados sempre em gabinetes chamados **"baffles"**, **sonofletores** ou **caixas acústicas** que, além de protegê-los, têm a função desejável de aumentar a sua eficiência acústica. Na nossa lição prática, trataremos do assunto, com maiores detalhes.

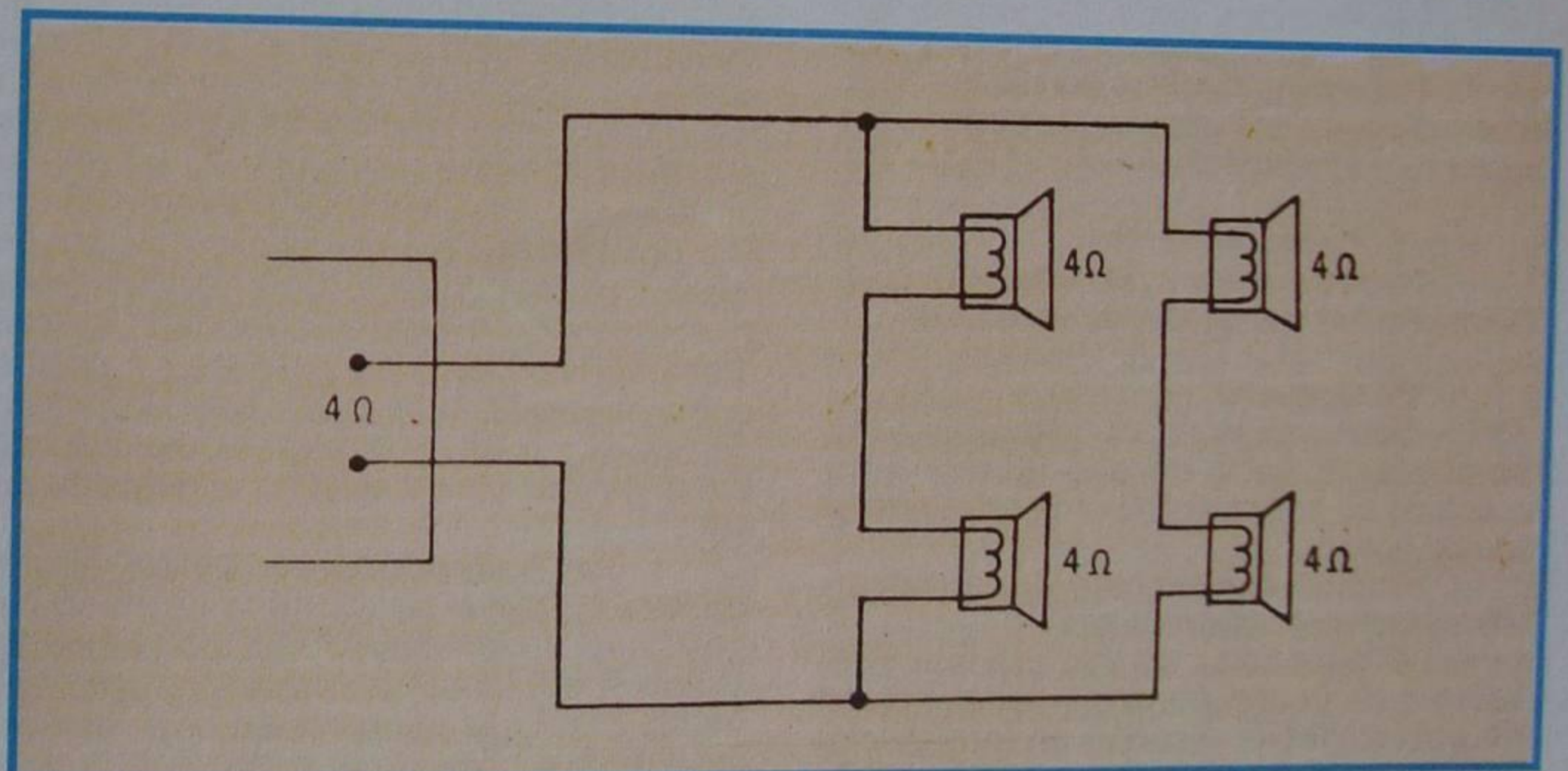



Figura 67 - Associação mista.

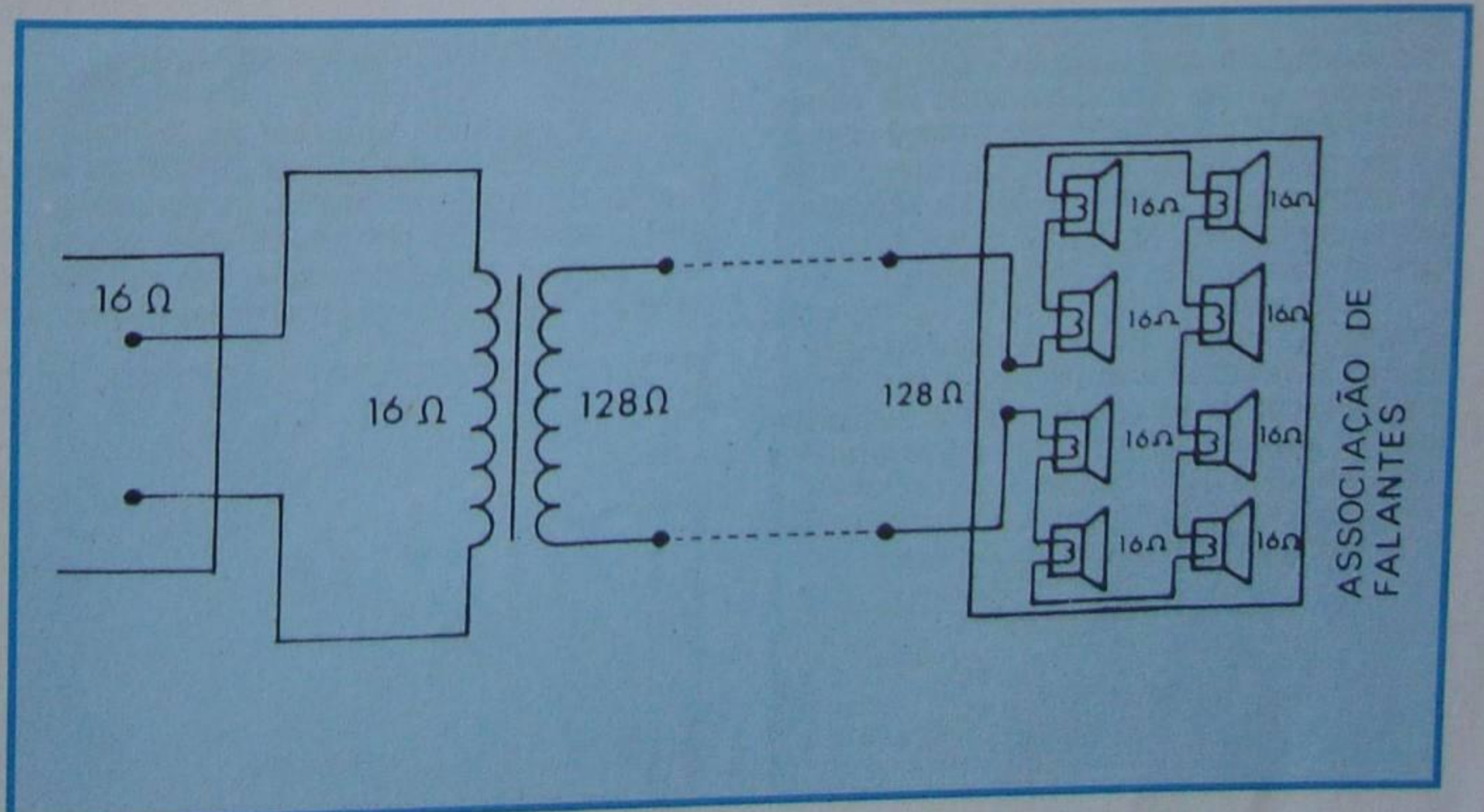



Figura 68 - Associação mista com valor não padronizado.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
12ª LIÇÃO PRÁTICA
SONOFLETORES

Foi citado, em nossa lição teórica, que a eficiência de um alto-falante é bastante baixa. Além disso, quando ele funciona ao ar livre, gera uma onda de compressão de um lado do cone e uma de tração (alívio) no lado oposto. Devido à oposição dessas duas ondas, a combinação nas diversas freqüências produz o cancelamento e/ou enfraquecimento de algumas delas, reduzindo a saída acústica e provocando distorção auditiva.

Para impedir a interação entre as ondas anterior e posterior irradiadas pelo alto-falante, emprega-se um tipo qualquer de caixa, que é denominado de **sonofletor ou caixa acústica**.

Nesta lição, vamos apresentar os tipos mais importantes de sonofletores de emprego generalizado na prática.

I - Classificação dos sonofletores

Podem-se dividir os sonofletores em duas classes principais, baseadas no sistema de irradiação:

1ª) **Irradiação direta**
Neste sistema, o cone do alto-falante está acoplado diretamente ao ar.

2ª) **Corneta**
Nos sonofletores do tipo corneta (ou trombeta), o cone do alto-falante está acoplado ao ar através de uma estrutura do tipo de corneta.

Ambos os sistemas de irradiação têm características diferentes.

O sonofletor do tipo corneta tem, sobre o de irradiação direta as vantagens de possuir maior alcance de freqüência, maior eficiência acústica e ausência de transitórios em uma ampla faixa de freqüências. Por outra parte, tem como desvantagens a necessidade de dimensões relativamente avantajadas quando se pretende que ele reproduza sons de baixa freqüência, e construção mais difícil que a do tipo de irradiação direta. Quando se trata de reprodução somente de freqüências altas, como nos "tweeters" é vantajoso o uso de reprodutores do tipo corneta.

Quanto ao sonofletor do tipo de irradiação direta, pode-se afirmar que o custo é relativamente baixo em comparação com o do tipo corneta a facilidade de construção, o tamanho relativamente pequeno e a possibilidade de controlar a distorção foram os fatores preponderantes que o conduziram à aceitação geral.

II - Tipos de sonofletores de irradiação direta

Dentre os vários tipos de sonofletores classificados como de irradiação direta, os mais difundidos são:

a) "Baffle" plano

O termo **baffle** é de origem inglesa, generalizado nos meios técnicos, mas não tem tradução adequada para nosso idioma.

Entende-e por "baffle" o dispositivo onde é instalado o alto-falante. O "baffle" plano nada mais é que uma placa (geralmente de madeira), na qual se faz uma abertura conveniente e instala-se o alto-falante. Na **figura 69**, ilustramos o assunto. A função do "baffle" é separar as ondas anterior e posterior irradiadas pelo alto-falante. É mais ou menos evidente que isso só poderá acontecer se a placa tiver dimensões avantajadas. As dimensões do "baffle" dependem do diâmetro do cone e da freqüência mais baixa que se queira reproduzir. Para que se tenha uma idéia quantitativa dessas dimensões, podemos adiantar que, para um alto-falante de 25 cm (10 polegadas), é necessário utilizar um "baffle" quadrado de 2,40 m de lado, para que a resposta nas freqüências baixas atinja 80 Hz. Por outro lado, se se deseja que a resposta mais baixa seja da ordem de 300 Hz, basta um "baffle" quadrado de 0,6 m de lado para o mesmo alto-falante de 10".

Nas instalações do "baffle" plano, quadrado, deve-se tomar o cuidado de posicionar o alto-falante fora do centro da chapa, a fim de evitar o cancelamento das freqüências cujo comprimento de onda seja da mesma ordem de grandeza que a distância entre a parte anterior e posterior do "baffle".

b) "Baffle" dobrado

É possível diminuir as dimensões (no plano) do "baffle" plano, dobrando seus lados, de modo a formar uma caixa de fundo aberto. Tal tipo de caixa é chamado de **"baffle" dobrado** ou **caixa de fundo aberto**. Os móveis comuns utilizados em receptores de mesa ou nos antigos combinados (rádio e eletrofone) de baixo custo são exemplos de "baffle" dobrado.

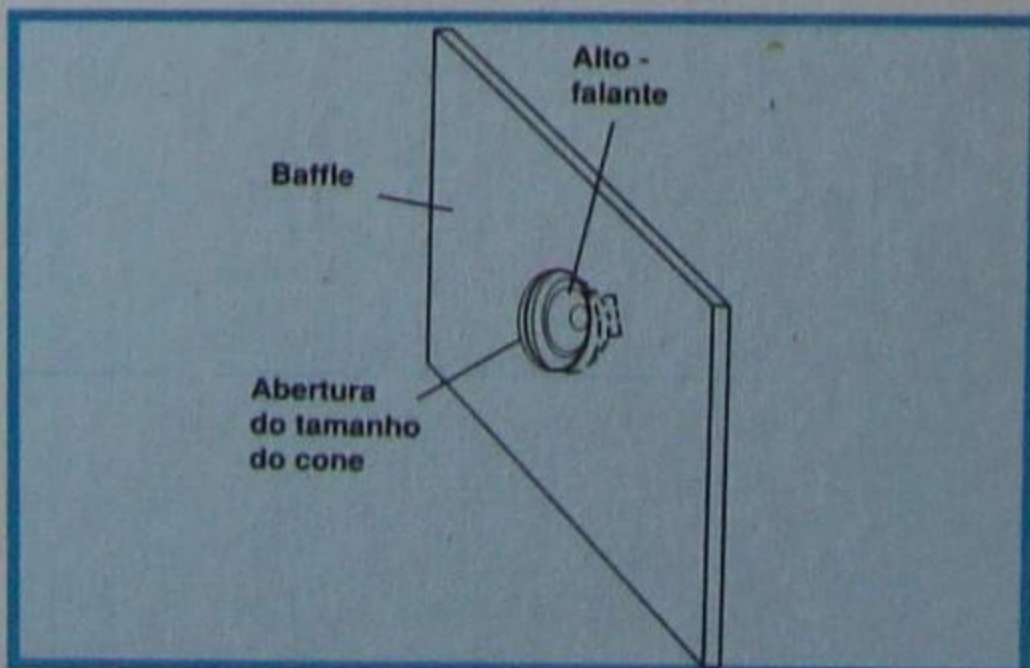



Figura 69 - Baffle plano.

O "baffle" dobrado atua como se fosse um "baffle" plano de dimensões correspondentes àquelas da caixa desdobrada.

O"baffle" dobrado, embora atue como "baffle" plano, segundo acabamos de afirmar, apresenta algumas características próprias, decorrentes do fato de ele ser também uma caixa ressonante. Assim é que, em caixa de dimensão inadequada, a ressonância do alto-falante pode coincidir com a ressonância própria da caixa e produzir um pico acentuado dessa freqüência. Isso constitui um "grave falso", impuro, conhecido como "som de barril". Além disso, as oscilações transitórias perturbam todas as notas graves, fazendo com que soem mal.

Deve-se evitar "baffle" dobrado de muita profundidade, para reduzir o efeito citado. Na prática, a relação entre largura e profundidade não deve ser superior a 3:1.

c) "Baffle" ideal

O "baffle" ideal é, como afirmamos, aquele que separa perfeitamente as ondas produzidas na parte da frente do alto-falante, daquelas produzidas em sua parte de trás. Na prática, é possível a construção do "baffle", que muito se aproxima do ideal, colocando-se o alto-falante em uma parede de separação entre dois ambientes, como mostramos na **figura 70**.

d) Caixa de ressonância infinita (suspensão acústica)

Quando o "baffle" é realmente uma caixa, passa a ser denominado de "caixa-acústica", "gabinete acústico" ou sonofletor.

A caixa de ressonância infinita, ou "baffle" infinito, nada mais é que uma caixa totalmente fechada, alojando o alto-falante em seu interior. Para evitar reflexões no

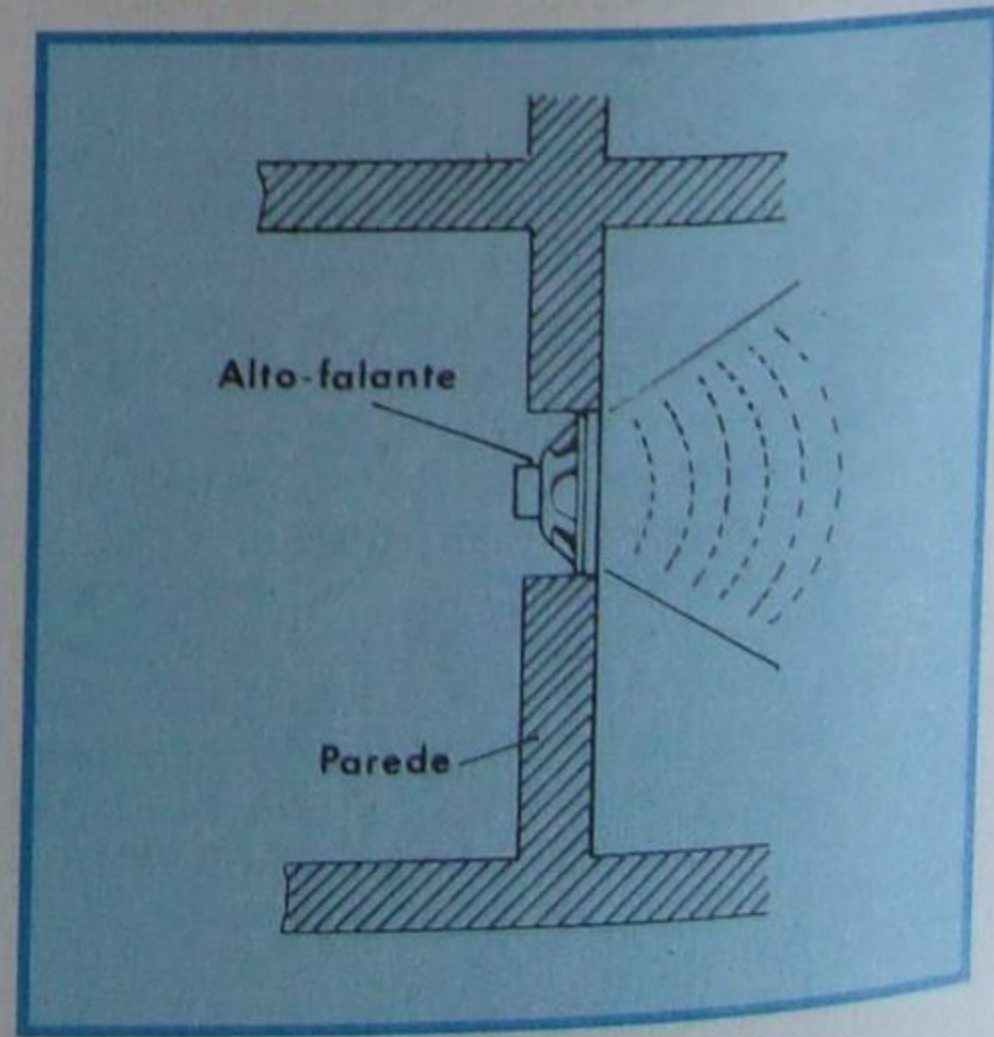



Figura 70 - Baffle ideal.

interior do gabinete, as quais produziriam ondas estacionárias e, conseqüentemente, distorção, a caixa totalmente fechada deve ser revestida internamente com camada de material absorvente de som, tais como lã de vidro, feltro, algodão, etc.

A grande vantagem do gabinete totalmente fechado é que suas dimensões podem ser bastante reduzidas em relação a outros tipos de sonofletores. Como a caixa é totalmente fechada, o movimento do cone comprime e distende a massa de ar em seu interior, a qual atua como uma suspensão de ar. Devido a isso, costuma-se chamar esse tipo de sonofletor de caixa de **suspensão acústica,** embora essa denominação não seja muito adequada.

A desvantagem da caixa totalmente fechada é que há aumento da freqüência de ressonância do alto-falante em relação àquelas ao ar livre. Isto é contrário ao efeito desejado, pois a resposta do alto-falante cai rapidamente abaixo da freqüência de ressonância e uma das finalidades da caixa é exatamente ampliar a faixa para o lado das freqüências baixas.

Para aproveitar a vantagem da caixa totalmente fechada de pequeno volume, criaram-se alto-falantes especiais, de grande **compliância** (veja nota que damos mais adiante), cuja freqüência de ressonância é bastante baixa, de modo que, mesmo sendo elevada pela caixa, ainda fica dentro do limite inferior de percepção do ouvido.

Em nosso mercado, esses alto-falantes são impropriamente designados de falantes de suspensão acústica. Nesses tipos de alto falantes os fabricantes procuram diminuir a compliância, amolecendo a suspensão do cone pelo emprego de material adequado, como couro, espuma de borracha, etc.

Os alto-falantes de alta compliância geralmente têm freqüências de ressonância ao ar livre abaixo de 30 Hz, sendo comum o valor de 20 Hz para falantes de alta qualidade.

O cálculo rigoroso de sonofletor do tipo de "suspensão acústica" não é simples. Geralmente, o que se faz é construir caixas de tamanhos distintos e medir a elevação da freqüência de ressonância. A partir daí, constrói-se gráfico para o falante ensaiado, gráfico esse que será útil no dimensionamento posterior. Como ordem de grandeza, à guisa de informação, podemos citar que certo alto-falante de 12" (30 cm) tem sua freqüência aumentada em 15%, quando o volume da caixa é diminuído em 50%. Daqui resulta que se podem utilizar móveis de reduzidas dimensões, abaixando ligeiramente a freqüência de ressonância do alto-falante.

Construtivamente, os sonofletores do tipo totalmente fechado devem merecer todos os cuidados que se dispensam a qualquer outro tipo de caixa, ou seja, boa rigidez mecânica, hermeticidade e agradável aparência exterior. Sobre estes aspectos, voltaremos ao assunto ao tratarmos do sonofletor do tipo refletor de graves (bass-reflex). Na **figura 71**, mostramos o corte de um sonofletor totalmente fechado, indicando as medidas adequadas a um alto-falante de 10" (25 cm) e cuja freqüência de ressonância seja da ordem de 40 Hz.

Para encerrar este tópico, devemos esclarecer que a caixa totalmente fechada e de pequeno volume tem rendimento baixo em relação a outros tipos de caixa. Esta deficiência costuma ser compensada utilizando-se alto-falante de maior rendimento.

Nota: Compliância é o nome que se dá à relação entre o deslocamento da bobina móvel e a força que produz esse deslocamento, ou seja, chamando de **C** a compliância, **d** o deslocamento e **F** a força:

$$C = \frac{d}{F}$$

A unidade de medida de compliância que mais se usa na prática é centímetro por dina. Pela expressão anterior, é fácil concluir que, entre dois alto-falantes de mesma construção, aquele de maior compliância tem maior deslocamento do cone.

e) Sonofletor tipo labirinto

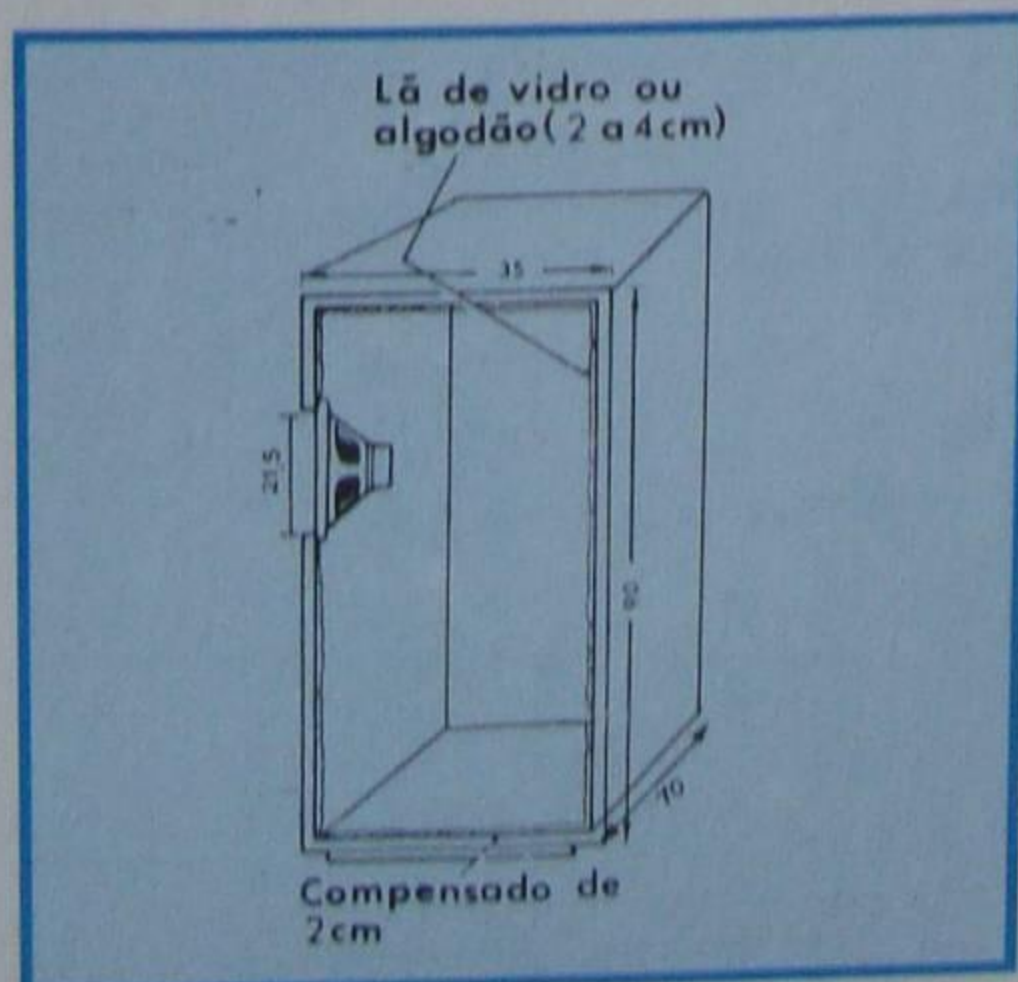
A caixa-acústica do tipo labirinto é semelhante com a do tipo refletor de graves, que estudaremos mais adiante, com a diferença de que a ressonância do cone é reduzida através da carga imposta por uma coluna de ar sintonizada. Quando a coluna de ar é igual a 1/4 do comprimento de onda da freqüência de ressonância do alto-falante, há o cancelamento da referida freqüência, aplanando-a e estendendo a resposta cerca de uma oitava abaixo da freqüência de ressonância.

Não é difícil de concluir que, nas freqüências mais baixas da faixa de áudio, 1/4 do comprimento de onda é um valor relativamente grande. De fato, suponha o aluno que o alto-falante tenha ressonância em 40 Hz. Considerando que a velocidade do som no ar é de cerca de 340 m/s, resulta que 1/4 do comprimento de onda é:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{340}{4 \times 40} = 2{,}125 \text{ m}$$

onde λ = comp. de onda

Ora, construir uma caixa com uma coluna interna de 2,125 m em uma só extensão não é prático; por isso, usa-se o artifício de dobrar o percurso através de um tubo ressonante, como mostramos na **figura 72**. Devido ao aspecto interno, a caixa é chamada de **sonofletor tipo labirinto**.

Na construção do sonofletor, devem ser observados os cuidados normais no que se refere à espessura da madeira, colagem, vedação, etc.

Em alguns tipos de labirinto, em decorrência da estrutura interna, o acesso ao alto-falante somente pode ser conseguido pela remoção do painel frontal.

Em conseqüência da dificuldade construtiva do sonofletor tipo labirinto, ele não é muito utilizado pelo construtor caseiro, embora seu desempenho seja bom e suas dimensões menores do que as do sonofletor do tipo "bass-reflex".

f) Refletor de graves (bass-reflex)

De todos os sonofletores de que se tem notícia, o mais difundido mercê de suas qualidades acústicas, baixo custo e facilidade de construção, é o conhecido como **refletores de graves** ou, em sua denominação inglesa: **bass-reflex**. Este tipo, usado desde a introdução da Hi-Fi até o momento mantém-se em destaque. Muitos sonofletores lançados no comércio como novidade, quando examinados a fundo, mostram ser nada mais que "bass-reflex" modificados.

Em razão da popularidade deste tipo de sonofletor e da facilidade com que pode ser fabricado, mesmo pelo construtor caseiro, vamos descrevê-lo com mais detalhes e fornecer as bases para que o aluno possa projetar e executar sua própria caixa.

O refletor de graves é uma caixa ressonante. O aluno certamente já teve oportunidade de verificar que, ao falar-se defronte de uma lata (dessas de 20 l) com fundo fechado, verifica-se que existe uma determinada freqüência para a qual o som é mais intenso. Essa é a freqüência de ressonância. Se for modificado o volume da lata verificar-se-á uma mudança na freqüência de ressonância. De um modo geral, pode-se afirmar que todo espaço confinado, possuindo abertura, apresenta uma freqüência própria de ressonância, que depende do volume e da dimensão da abertura.

Em razão do que se expos, não é difícil associar o circuito ressonante acústico ao RLC elétrico. Podemos comparar a indutância elétrica com a inércia do ar, isto é, com sua reação ao movimento. Essa inércia depende da massa de ar e, conseqüentemente, do volume da caixa. A capacitância elétrica pode ser comparada à reação à compressibilidade do ar na caixa. Essa reação depende da abertura existente na caixa. Finalmente, pode-se comparar a

Figura 71 - Sonofletor em corte.

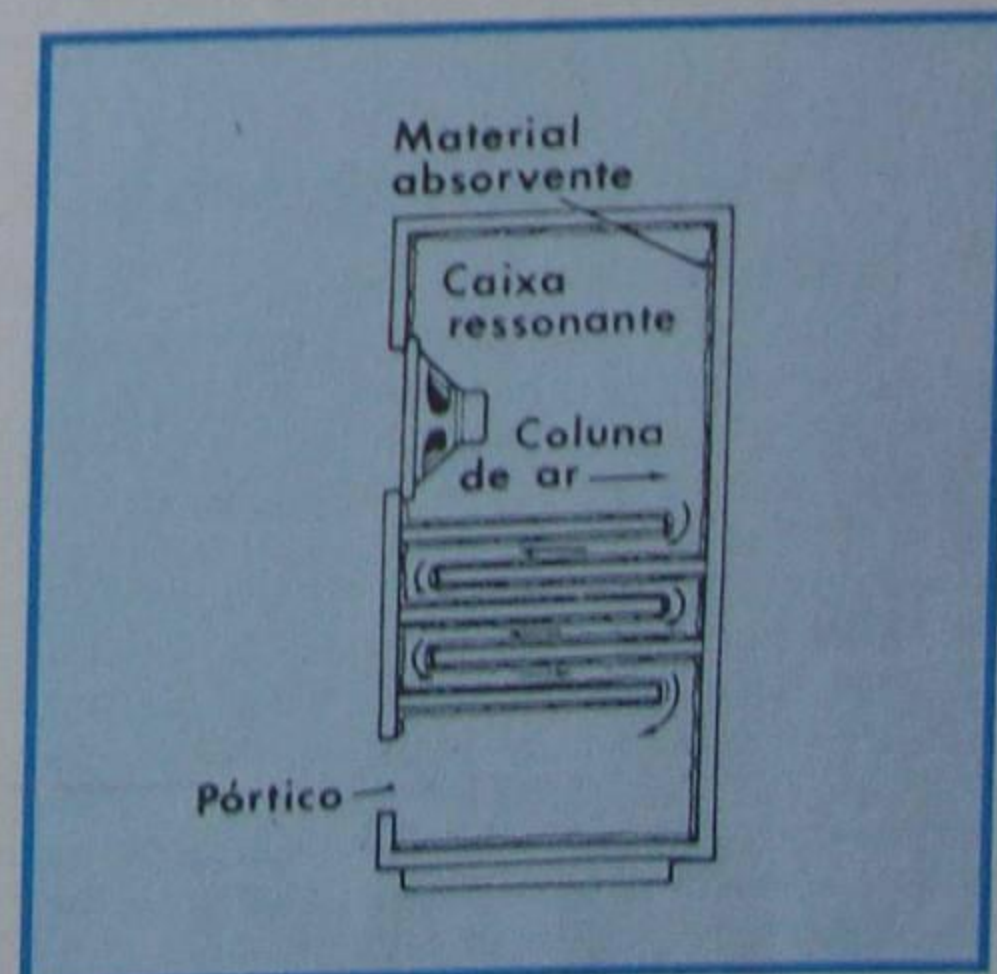



Figura 72 - Sonofletor tipo labirinto.

resistência elétrica do circuito RLC, com a viscosidade, isto é, com a fricção do ar.

Em resumo, a caixa-acústica ressonante é uma "bobina de ar", cuja freqüência de ressonância depende do volume (indutância acústica) e da área da abertura (capacitância acústica), e cujo fator de mérito dependerá da viscosidade (resistência acústica).

Como no circuito LC elétrico, conforme veremos em momento oportuno, se pode modificar a freqüência de ressonância fazendo-se variar a capacitância, a indutância ou ambas, no acústico pode-se modificar a freqüência de ressonância da caixa mudando-se o volume, a área de abertura ou ambas.

A área de abertura do refletor de graves é comumente chamada de **pórtico.**

Na **figura 73**, mostramos os elementos de um circuito ressonante RLC e seus equivalentes acústicos.

Figura 73 -Equivalência entre os circuitos elétricos e acústicos.

Neste ponto, o aluno deve estar indagando sobre o porquê de se utilizar uma caixa ressonante na reprodução dos graves, quando o que se pretende é evitar o pico de ressonância do cone do alto-falante, ou seja, tornar a resposta plana dentro de toda a faixa de áudio. Explica-se: É que a ressonância da caixa corresponde à de um circuito RLC paralelo e a do alto-falante, a de um circuito RLC série. Deste modo, seus efeitos são opostos e, obrigando-se a que as freqüências (de ressonância para o circuito do alto-falante e anti-ressonância para o circuito acústico) coincidam, elas se cancelam. Na prática, o cancelamento não é perfeito e depende do fator de mérito dos circuitos, mas o resultado global é bastante aceitável.

Vamos, a seguir, mostrar como se calcula e constrói um sonofletor do tipo "bass-reflex". Daremos uma fórmula que, dentre as várias propostas por diversos autores, na prática foi a que se mostrou mais precisa.

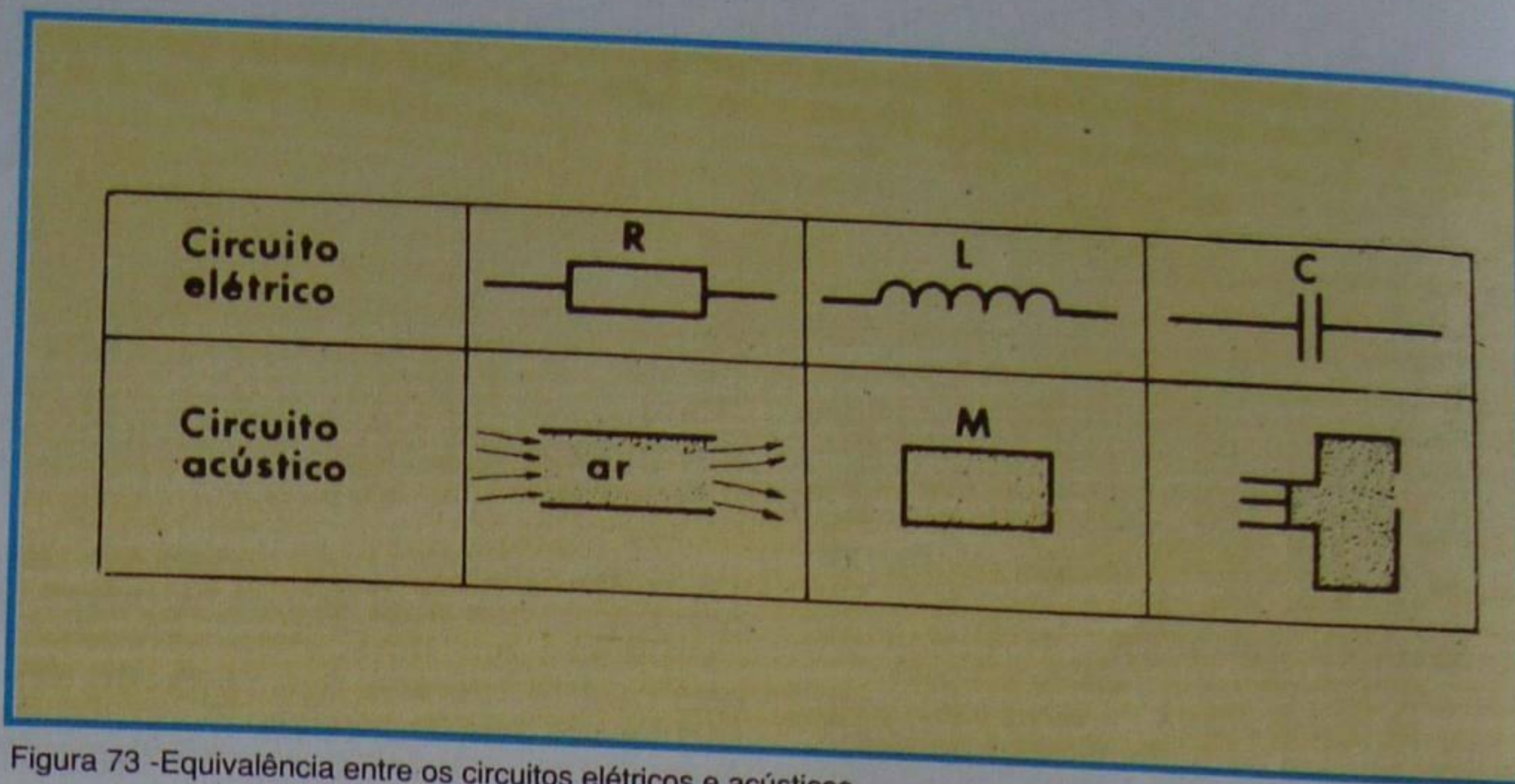
III - Dimensionamento do refletor de graves

Embora existam no mercado especializado caixas-acústicas do tipo refletor de graves construídas para alto-falantes dos mais variados tamanhos, o técnico não se deve iludir sobre suas apregoadas qualidades, a não ser que elas tenham sido projetadas para um tipo específico de alto-falante.

Para que o aluno tenha elementos para resolver seus problemas particulares de caixa-acústica tipo refletor de baixas, apresentaremos em seguida dados e sugestões.

1 - Dimensões da caixa

a) Volume

Do que se pode concluir dos esclarecimentos anteriores, é possível combinar o volume da caixa com a área do pórtico, para que a ressonância se dê em uma freqüência determinada, freqüência essa que deve ser igual a de ressonância ao ar livre do cone do alto-falante. Existem infinitas possibilidades de combinação entre volume e área do pórtico para uma dada freqüência de ressonância, do mesmo modo que se podem escolher L e C em um circuito ressonante elétrico, para que haja ressonância. Neste último caso, o aluno está correto ao supor que há uma relação determinada entre L e C, que permite obter o melhor rendimento. Analogamente, no circuito acústico há, também, uma relação ótima entre volume da caixa e área do pórtico que proporciona o rendimento acústico mais elevado. Na prática, a fórmula, ligando o volume, pórtico e freqüência de ressonância, que dá valor bastante satisfatório é:

$$V = \frac{2\,992\,A}{f_r^2\,(d + 1{,}13\sqrt{A})}$$

onde **V** é o volume da caixa, **A** a área do pórtico, f_r a freqüência de ressonância do alto-falante ao ar livre e **d**, a espessura das paredes da caixa. Considerando-se **A** em metros quadrados, f_r em hertz e **d** em metros, resulta o volume em metros cúbicos.

b) Forma da caixa

Teoricamente se pode adotar qualquer forma para a caixa-acústica; entretanto, deve ser evitado volume irregular.

Sob o ponto de vista construtivo e estético, deve-se dar, preferivelmente, à caixa acústica a forma de prisma retangular, isto é, realmente de caixa. A experiência tem demonstrado que a caixa é mais eficiente quando seus lados estão na relação de aproximadamente 5:3:2, isto é, a relação entre a altura e largura é de 5/3 e entre altura e profundidade de 5/2. Para ilustração, apresentamos a **figura 74**, onde chamamos de **h** a altura, l a largura e **p** a profundidade. Evidentemente, essa proporção pode sofrer ligeiras variações sem alterar o funcionamento da caixa, desde que o volume necessário seja mantido.

Se mantivermos a proporção indicada, poderemos determinar a altura pela fórmula:

$$h = \sqrt{(25 \div 6) \cdot V}$$

e as demais dimensões por:

$$l = \frac{3}{5}h \quad \text{e} \quad p = \frac{2}{5}h$$

Por exemplo, suponhamos que se queira calcular as dimensões dos lados de uma caixa cujo volume seja de 240 l, ou seja, 0,24 m³. Utilizando a fórmula anterior, teremos:

$$h = \sqrt[3]{(25 \div 6) \cdot 0{,}24\ m^3}$$

$$h = \sqrt[3]{4{,}16 \cdot 0{,}24\ m^3}$$

$$h = \sqrt[3]{1\ m^3} = 1\ m$$

Conseqüentemente, a largura será:

$$l = \frac{3}{5}\ h = \frac{3}{5} \times 1 = 0{,}6\ m$$

e a profundidade:

$$p = \frac{2}{5}\ h = \frac{2 \times 1}{5} = 0{,}4m$$

Se o aluno não souber o método de extração de raiz cúbica, poderá determinar as dimensões por tentativas.

c) Pórtico

Como se nota analisando a fórmula que permite determinar o volume, é necessário conhecer a área do pórtico, para poder aplicá-la. Praticamente, obtém-se o melhor resultado fazendo com que a área do pórtico esteja relacionada com a área útil do cone do alto-falante. As regras que se costuma obedecer são:

1ª) Toma-se a área do pórtico igual à da superfície útil do falante, quando seu valor em polegadas quadradas é menor, numericamente, que o valor da freqüência de ressonância.

2ª) Quando a área é maior em número que o valor da freqüência de ressonância, toma-se como área o valor numérico desta última, em polegadas quadradas.

Antes de darmos exemplos,

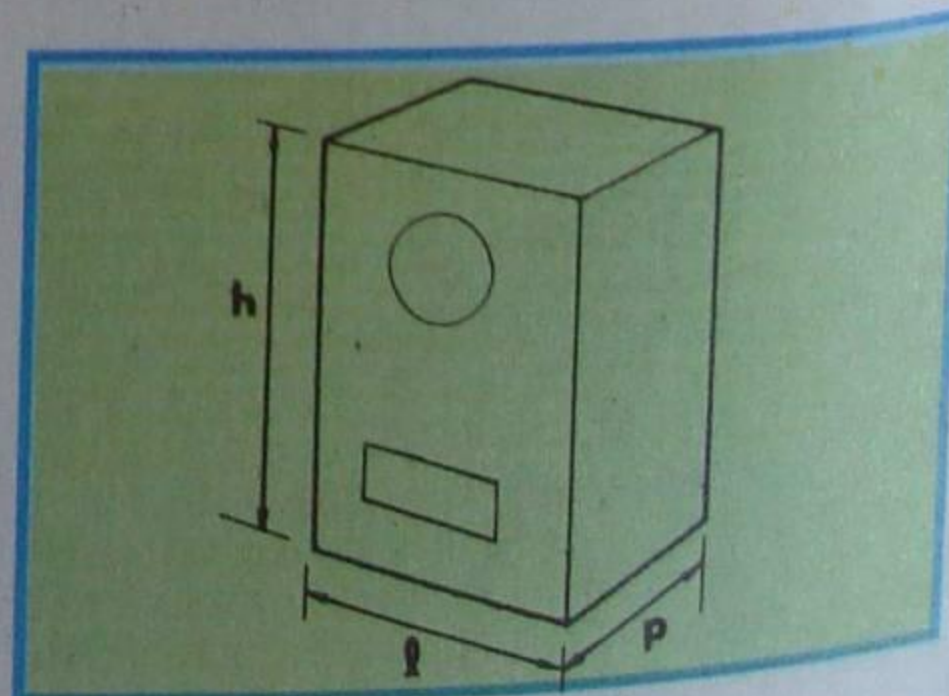



Figura 74 - Dimensões de uma caixa.

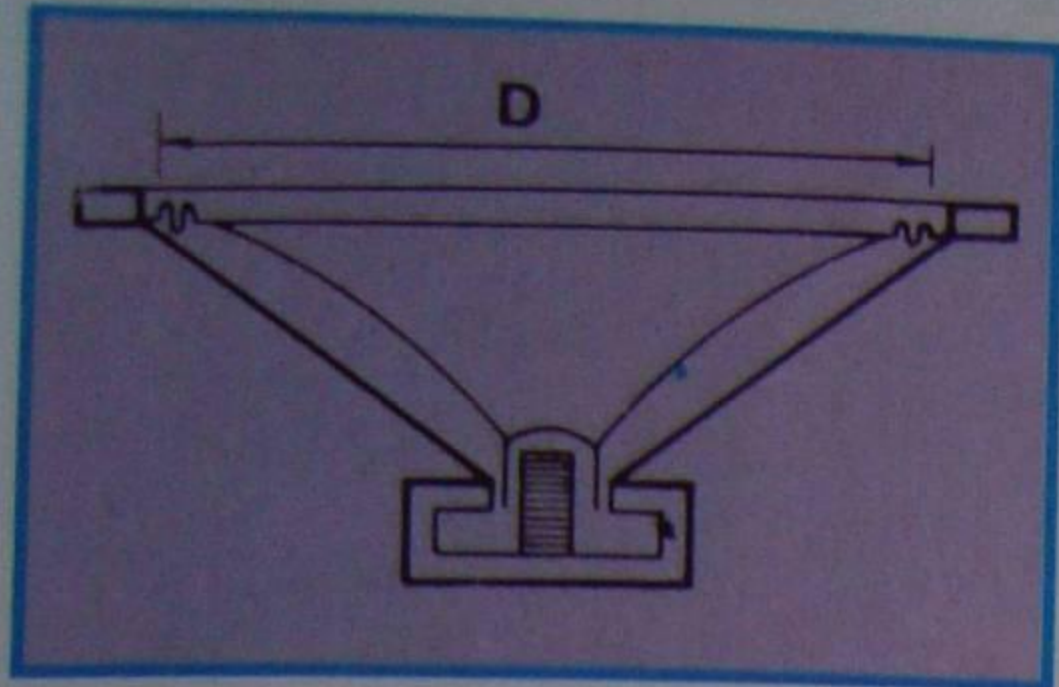



Figura 75 - Área útil do cone.

devemos observar que:

1ª) Chama-se área útil do alto-falante à do círculo cujo diâmetro corresponde à distância entre as rugosidades (suspensão) do cone. Na **figura 75**, mostramos essa distância em corte, para que não fiquem dúvidas.

Deve-se notar que essa distância não é padronizada; por isso, é necessário medi-la diretamente no alto-falante.

2ª) A área do cone é calculada pela fórmula:

$$S_c = \frac{\pi D^2}{4} \text{ ou simplesmente } S_c = 0{,}785\ D^2$$

Esse valor deve entrar na fórmula do cálculo do volume, em metros quadrados.

Feitas estas observações, vamos dar um exemplo de escolha da área do pórtico.

Suponhamos que se deva escolher a área do pórtico de uma caixa refletora de graves, sabendo que o alto-falante é de 10 polegadas (nominais) e sua freqüência de ressonância, ao ar livre, é de 50 Hz. A medida do diâmetro útil do cone é de 8,8".

Inicialmente, determina-se a área do cone em polegadas quadradas. Tem-se:

$$S_c = 0{,}785 \times (8{,}8)^2$$

$$S_c = 0{,}785 \times 77{,}44$$

$$S_c = 60{,}79 \text{ polegadas quadradas}$$

Comparando com a freqüência de ressonância, 50 Hz, vemos que, numericamente, S_c é maior que f_r; logo, tomaremos para área do pórtico o valor numérico de f_r, ou seja, 50 polegadas quadradas.

Para transformar polegadas quadradas em centímetros quadrados, devemos multiplicar por 6,45; logo:

$$S_c = 50 \times 6{,}45 = 322{,}5\ cm^2$$

Como na fórmula do volume S_c deve figurar em metros quadrados, faz-se a transformação de centímetros quadrados para metros quadrados, dividindo-se por 10 000. Assim:

$$S_c = 322{,}5\ cm^2 = \frac{322{,}5}{10\ 000}\ m^2 = 0{,}03225\ m^2$$

d) Freqüência de ressonância

O valor da freqüência de ressonância que se considera na fórmula do volume da caixa acústica corresponde àquele do alto-falante ao ar livre, ou seja, livre de qualquer tipo de "baffle". Esse valor costuma ser indicado pelo fabricante, juntamente com a potência de entrada e impedância da bobina móvel. Quando não houver indicação, será fácil determiná-lo desde que se disponha de instrumentos adequados que são, no mínimo, um gerador de áudio e um indicador de saída (Voltímetro, osciloscópio, etc.).

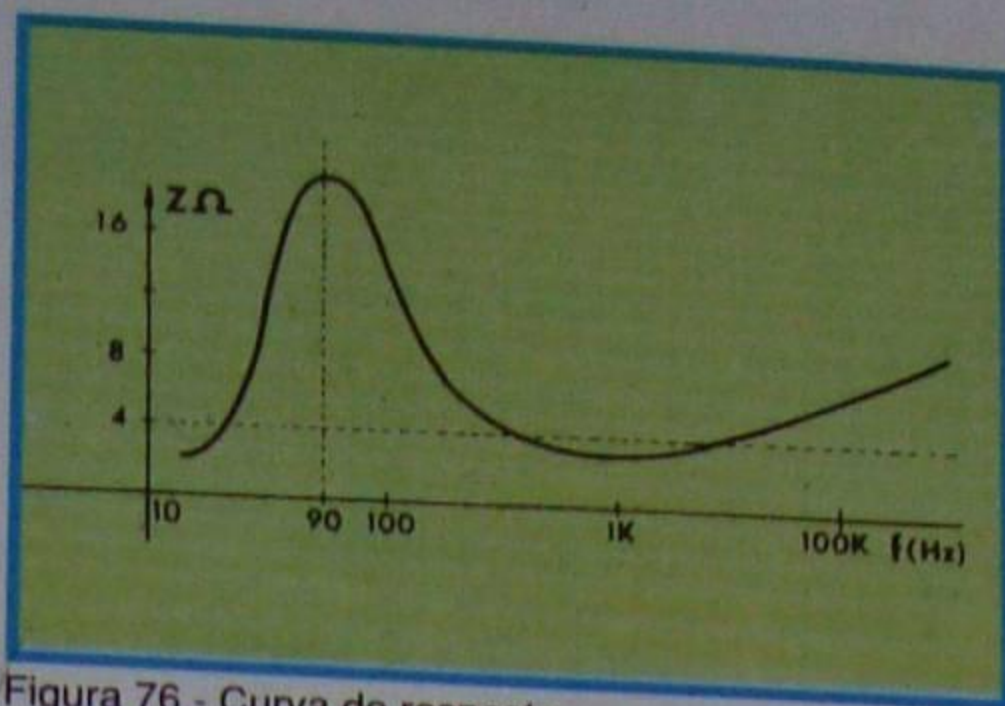



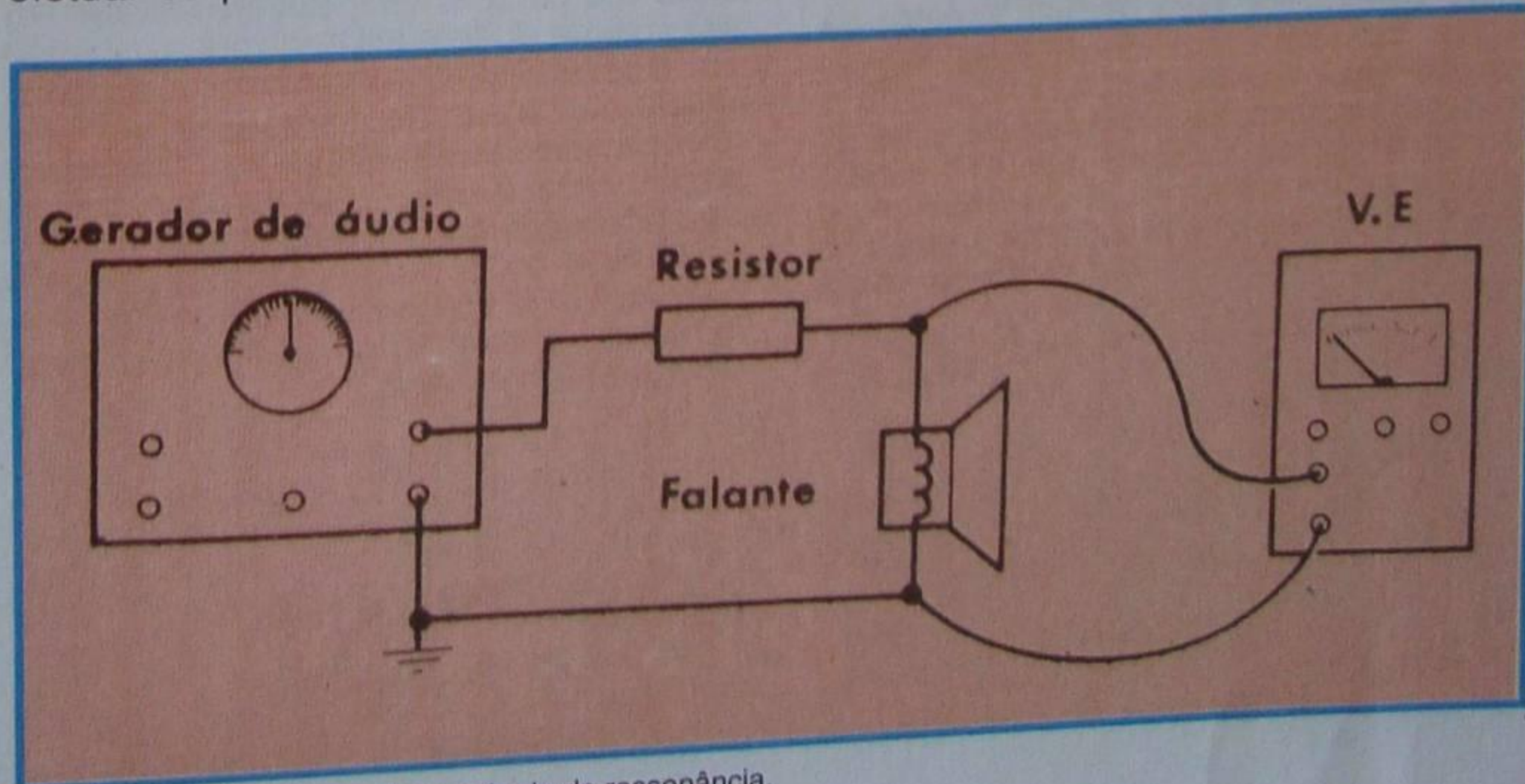
Figura 76 - Curva de resposta.

Costuma-se afirmar que um alto-falante reprodutor de graves (woofer) é tanto melhor quanto mais baixa é sua freqüência de ressonância. Esta afirmativa tem fundamento, porque todo alto-falante atua como um filtro que corta abruptamente as freqüências abaixo da de ressonância. Isto pode ser observado na **figura 76**, que corresponde à curva de resposta "aplanada" de um determinado alto-falante.

A determinação da freqüência de ressonância de um alto-falante é comodamente feita através do arranjo que se mostra na **figura 77**: Aplica-se ao alto-falante a tensão de saída de um gerador de áudio, através de um resistor cujo valor não é crítico. Pode ter 3 a 4 vezes o valor da impedância da bobina móvel. Por exemplo, se o falante for de 8 Ω, poderá ser utilizado resistor entre 20 e 30 Ω. Deve-se observar que se a potência de saída do gerador for muito baixa, será necessário intercalar entre ela e o resistor um amplificador de potência que tenha resposta linear no começo da faixa.

Variando-se a freqüência do gerador a partir da mais baixa, isto é, desde uns 10 Hz, observa-se aquela para a qual a indicação do Voltímetro é mais elevada. Esta corresponde à freqüência de ressonância ao ar livre do alto-falante, que intervirá no cálculo do volume da caixa.

IV - Construção da caixa

Após o cálculo teórico das dimensões do sonofletor, o técnico deve efetuar ou providenciar a construção do mesmo e, neste último caso, fornecer ao marceneiro uma planta com o máximo de detalhes. Destes devem constar não só as medidas, como o processo de fixação, localização dos furos e material de acabamento. As sugestões que podemos dar são:

a) Utilizar, para o corpo da caixa, somente compensado de madeira com espessura mínima de 2 cm.

b) Fixar as tábuas através de cantoneiras coladas e aparafusadas.

c) Utilizar como cobertura do painel do alto-falante somente tecido especial do tipo ortofônico, cuja transparência para o som é de cerca de 80%.

d) Como acabamento, convém usar laminados de madeira nobre que, envernizados, dão aspecto muito bonito ao sonofletor.

e) A caixa deve ser revestida internamente com materiais absorventes de som, tais como lã de vidro, manta de algodão (dessas utilizadas como enchimento pelos alfaiates), etc.

f) A fixação do alto-falante deve ser efetuada vigorosamente por cola e parafusos adequados, de modo que sua carcaça não vibre e que não haja a passagem de ar entre ela e o painel.

g) Também a tampa traseira deve receber material absorvente e ser vigorosamente fixada à caixa, através de parafusos. Essa tampa, preferivelmente, deve ser removível; logo, nela não se passará cola. É de se notar que ela deve ser construída com madeira da mesma espessura que a do restante da caixa.

h) É bastante importante a localização do pórtico em relação à sua distância do alto-falante. O pórtico efetua o acoplamento entre o ar exterior e o interior da caixa. A localização muito perto do alto-falante corresponde a um acoplamento frouxo e a influência da caixa sobre o pico de ressonância do alto-falante é pequena. Para que a ação de amortecimento do pico seja eficiente, é necessário acoplamento "cerrado". Consegue-se essa condição situando a abertura (pórtico) distante do alto-falante. Essa abertura costuma ser efetuada no mesmo painel do alto-falante e na parte inferior. Por facilidade construtiva, costuma-se fazer a abertura em forma retangular; entretanto, ela pode ter qualquer outra, inclusive furos e rasgos.

V - Exemplo de projeto

Como orientação para projetos que o aluno pretenda efetuar, vamos apresentar

Figura 77 - Determinação da freqüência de ressonância.

um exemplo de cálculo que permite chegar a bons resultados práticos.

Determinemos, então o volume e demais dimensões de um refletor de graves, para abrigar um alto-falante de 25 cm (10"), cujo diâmetro útil e freqüência de ressonância, medidos, são, respectivamente, 22 cm e 45 Hz.

Solução:

a) Área do pórtico

Como se explicou anteriormente, deve-se determinar a área do pórtico em polegadas quadradas e comparar o valor obtido com o valor numérico da freqüência de ressonância. Caso este último seja menor, será tomado para valor da área em polegadas quadradas.

Assim, teremos:

$$S_C = 0{,}785 \times \left(\frac{22}{2{,}54}\right)^2 = 0{,}785 \times (8{,}661)^2$$

$$S_C = 0{,}785 \times 75{,}012921 \cong 58{,}885$$

Como o valor da freqüência de ressonância é de 45 Hz, portanto menor **em valor numérico** que o calculado, tomaremos a área do pórtico igual a 45 polegadas quadradas, a qual, transformada para metros quadrados, será:

$$S_C = \frac{45 \times 6{,}45}{10\,000} = \frac{290{,}25}{10\,000} = 0{,}029025 \text{ m}^2$$

Note que multiplicamos por 6,45 para transformar a medida da área (45 polegadas quadradas) em centímetros quadrados, e dividimos por 10 000 para transformar centímetros quadrados em metros quadrados.

b) Volume da caixa

O volume é calculado pela fórmula:

$$V = \frac{2\,992\,A}{f_r^2(d + 1{,}13\sqrt{A})}$$

Considerando que a espessura da madeira a ser usada na confecção da caixa é de 2 cm, tomaremos:

$$d = 2 \text{ cm} = 0{,}02 \text{ m}$$

A freqüência de ressonância é 45 Hz; entretanto, é conveniente considerá-la 2 ou 3 Hz menor, para facilitar o ajuste da caixa. De fato, com menor freqüência, resulta maior volume, o que compensará o volume ocupado pelo alto-falante e pelas cantoneiras de fixação que não estão computadas na fórmula do volume, e permitirá o ajuste da sintonia pela variação do pórtico, como mostraremos mais adiante.

Desse modo, tomaremos $f_r = 42$ Hz, onde:

$$f_r^2 = 42^2 = 1\,764$$

Como S_C, calculado no item anterior, é de 0,0290 m^2, aproximadamente, teremos, substituindo na fórmula de V:

$$V = \frac{2992 \times 0{,}0290}{1\,764\,(0{,}02 + 1{,}13\sqrt{0{,}0290})}$$

Como: $\sqrt{0{,}0290} \cong 0{,}1702$

temos:

$$V = \frac{2\,992 \times 0{,}0290}{1\,764\,(0{,}02 + 1{,}13 \times 0{,}17029)}$$

$$V = \frac{2\,992 \times 0{,}0290}{1\,764\,(0{,}02 + 0{,}1924277)}$$

$$V = \frac{2\,992 \times 0{,}0290}{1\,764 \times 0{,}2124277}$$

$$V = \frac{86{,}768}{374{,}7224}$$

$$V = 0{,}231 \text{ m}^3 \text{ ou 230 litros, aprox.}$$

Daqui resulta:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{25}{6}\right)V} = \sqrt[3]{\frac{25 \times 230\,000}{6}}$$

$$h = \sqrt[3]{958\,333} \cong 99$$

ou, arredondando, 100 cm.

Tendo-se **h**, resultam para ***l*** e **p** os valores:

$$l = \frac{3}{5} . h = \frac{3 \times 99}{5} = \frac{297}{5} = 59{,}4$$

e

$$p = \frac{2}{5} . h = \frac{2 \times 99}{5} = \frac{198}{5} = 39{,}6$$

Observa-se que a caixa é de dimensão avantajada; entretanto, seu desempenho é muito bom, usando-se um alto-falante de 25 ou 30 cm do tipo "full-range" (alcance completo), cuja freqüência de ressonância esteja próxima dos 45 Hz.

Se a caixa se destinar exclusivamente à reprodução de graves, isto é, freqüências inferiores da faixa de áudio (20 Hz a 1 KHz, aproximadamente), seu volume poderá ser reduzido à metade, e o desempenho ainda será aceitável. Nestas condições, fixa-se o valor do volume e recalcula-se a área do pórtico. Como este cálculo envolve uma equação do 2º grau de solução trabalhosa, é conveniente fixar um valor mais baixo para a área do pórtico e recalcular o volume. Por exemplo, se tomarmos para área do pórtico metade do valor anterior, ou seja:

$$A = \frac{0{,}029}{2} = 0{,}0145$$

o novo valor do volume será:

$$V = \frac{2\,992 \times 0{,}0145}{1\,764\,(0{,}02 + 1{,}13\sqrt{0{,}0145})}$$

$$V = \frac{43{,}384}{1\,764\,(0{,}02 + 1{,}13 \times 0{,}1204159)}$$

$$V = \frac{43{,}384}{1\,764\,(0{,}02 + 0{,}13607)}$$

$$V = \frac{43{,}384}{1\,764 \times 0{,}15607}$$

$$V = \frac{43{,}384}{275{,}30748}$$

$$V = 0{,}1575838 \text{ m}^3 \cong 158 \text{ litros}$$

Considerando o volume do alto-falante e das travessas, pode-se adotar:

$$V = 160 \text{ litros}$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{25}{6} \times 160\,000 \text{ cm}} = \sqrt[3]{\frac{4\,000\,000}{6}}$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{4 \times 10^6}{6}} = 10^2 \sqrt[3]{\frac{4}{6}}$$

$$h = 10^2 \sqrt[3]{\frac{2}{3}} = 100 \times \frac{\sqrt[3]{2}}{\sqrt[3]{3}}$$

$$h = 100 \times \frac{1{,}26}{1{,}44} = 100 \times 0{,}875$$

$$h = 87{,}5 \text{ cm}$$

$$l = \frac{3}{5} \times 87{,}5 = \frac{262{,}5}{5} = 52{,}5 \text{ cm}$$

e:

$$p = \frac{2}{5} \times 87{,}5 = 35 \text{ cm}$$

Como se nota, caixa com estas dimensões é bem menor do que a calculada anteriormente.

VI - Sintonia do sonofletor

Como se afirmou anteriormente, o refletor de graves é um circuito sintonizado acusticamente, e para que seu funcionamento seja correto há necessidade de ajustá-lo, isto é, de casar a freqüência de ressonância do alto-falante com a de anti-ressonância do sonofletor, para que haja o aplanamento da curva de resposta do conjunto.

A sintonia do sonofletor é muito fácil; entretanto, é trabalhosa, porque exige o levantamento de uma ou mais curvas de resposta. Uma sintonia perfeita exigiria que o levantamento das curvas fosse efetuado em câmaras anecóicas (salas sem eco), instalação cara de que pouquíssimos laboratórios dispõem.

Usualmente, o levantamento da curva de resposta do conjunto – alto-falante + sonofletor – é feito de modo análogo ao indicado para a obtenção da freqüência de ressonância do alto-falante ao ar livre, ou seja:

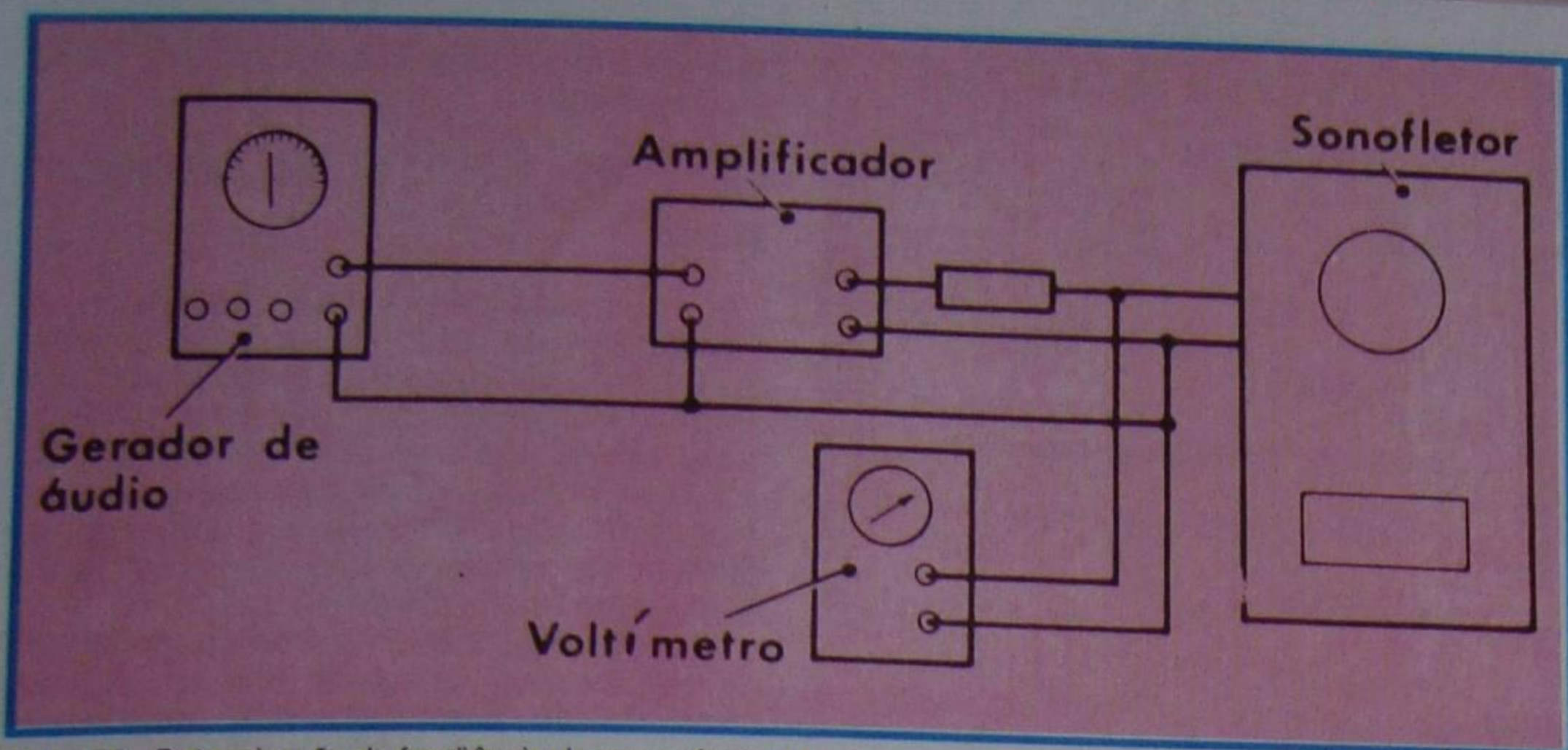



Figura 78 - Determinação da freqüência de ressonância da caixa.

a) Liga-se a saída de um amplificador de potência linear à entrada do alto-falante, devidamente instalado no sonofletor, através de um resistor de 50 a 100 Ω. Deve-se observar que a caixa acústica tem que estar completamente acabada na parte interna e totalmente vedada pela tampa traseira.

b) À entrada do amplificador injeta-se o sinal de um gerador de áudio adequado.

c) À entrada do alto-falante liga-se o medidor de saída, que pode ser um Voltímetro ou multiprovador de boa sensibilidade.

O arranjo é mostrado na **figura 78**.

d) Agora, ajusta-se o nível de entrada do sinal de áudio no amplificador, de modo que dê leitura de cerca de 1 V no Voltímetro, para a freqüência de 1 KHz.

e) Em seguida, sem mexer em nada (estamos admitindo que a saída do gerador é constante para todas as freqüências), gira-se a sintonia do gerador de áudio para o início da faixa e efetuam-se as leituras de tensão para variações e freqüências de 5 em 5 Hz, desde 20 Hz até cerca de 120 Hz. Note que estamos admitindo que a freqüência de ressonância do alto-falante é aquela de 45 Hz escolhida para nosso projeto. Se a freqüência for outra, as medidas deverão ser efetuadas em faixa de freqüências simétrica à de ressonância.

f) Efetuadas as medidas de tensão x freqüência, faz-se o gráfico, tendo as freqüências em abscissa e a tensão em ordenadas. Há três possibilidades:

1ª) A curva se apresenta como aspecto que mostramos na **figura 79**. Neste caso, por sorte a sintonia está correta. Note o aluno que na freqüência de ressonância do alto-falante aparecerá um vale, cuja profundidade depende do amortecimento do conjunto. Aparecem também dois picos simétricos à freqüência de ressonância. Se a amplitude desses picos for muito acentuada, será possível diminuí-la acrescentando camadas de tela de seda, bem esticadas em frente ao pórtico.

Figura 79 - Curva ideal.

2ª) A curva tem o aspecto da **figura 80**. Aqui aparece um pico mais elevado no lado das freqüências baixas. Isto significa que a ressonância do sonofletor está abaixo daquela do alto-falante, ou seja, o volume ou o pórtico excedem o necessário. Neste caso, como é mais difícil modificar o volume da caixa que a abertura do pórtico, age-se sobre este último. Para isto, veda-se uma parte do pórtico com um pedaço de tábua e levanta-se nova curva. Se a vedação foi excessiva, ou insuficiente, modifica-se a posição da tábua, até encontrar a sintonia. Como afirmamos, o ajuste da caixa acústica é trabalhoso, porque requer o levantamento da curva de resposta para cada posição da tábua de vedação do pórtico.

3ª) Finalmente, pode acontecer que a primeira curva de resposta tenha o aspecto da **figura 81**. Esta situação é contrária a anterior e significa que a abertura do pórtico é insuficiente. Neste caso, o pico maior situa-se à direita da freqüência de ressonância. Para aumentar a área do pórtico, podem-se efetuar furos em volta do pórtico, ou mesmo recortá-lo. Também neste caso há necessidade do levantamento de curvas, para aumento gradual do pórtico.

O ajuste da ressonância do sonofletor termina quando se obtém a curva semelhante à da figura 79. Quando isso se dá, cola-se o tecido ortofônico diretamente no painel frontal e se providencia o acabamento da caixa. Ao invés de colar o tecido, também se pode fazer o que se chama de "grade", com material adequado e fixando-a através de presilhas especiais.

VII - Refletor de graves com túnel

Afirmamos, anteriormente, que o desempenho da caixa acústica do tipo refletor de graves é melhor em caixa de grande volume. A diminuição do volume da caixa, que se consegue quando se toma pequena área para o pórtico, é admissível se o sonofletor for utilizado unicamente como reprodutor de graves, ficando a cargo de outro (ou outros) alto-falante a reprodução das demais freqüências. Visando conservar as boas características do "bass-reflex", mesmo em caixa de dimensões reduzidas, os fabricantes introduziram refletor de graves com túnel ou duto. Este artifício consiste no prolongamento das paredes do pórtico, formando assim o túnel que nomeia a caixa. Um exemplo de duto é mostrado na **figura 82**. O volume desse tipo de sonofletor pode ser determinado, aproximadamente pelo emprego da fórmula já apresentada ao aluno, na qual se considerará **d** como o comprimento do túnel.

Se recorrermos à analogia entre o circuito elétrico e o acústico, poderemos considerar o duto como o efeito da introdução de um núcleo de ferro na bobina. Assim, como o núcleo de ferro aumenta a indutância elétrica o duto aumenta a indutância acústica, ou seja, o volume da caixa.

O túnel tanto pode situar-se dentro como fora da caixa, mas, por motivos estéticos é hábito colocá-lo dentro da caixa. Neste caso, ao volume da caixa calculado pela fórmula que apresentamos deve-se acrescer o volume do duto.

Vamos apresentar um exemplo de cálculo que permitira ao aluno comparar o efeito do duto na redução do volume da caixa.

Consideremos, então, um alto-falante cujo diâmetro útil do cone é de 28 cm e freqüência de ressonância de 35 Hz.

a) Volume sem duto

A área do cone é:

$$S_c = 0,785 \times 28^2 = 0,785 \times 784 = 615,44 \text{ cm}^2$$

Em polegadas quadradas, é:

$$S_c = \frac{615,44}{6,45} = 95,41$$

Segundo as observações anteriores, dever-se-á tomar para área do pórtico o valor numérico da freqüência de ressonância, isto é, 35 polegadas ao quadrado. Entretanto, quando o cone é de grande área e a freqüência de ressonância é baixa, essa regra deixa de ter validade. Neste caso, os construtores aconselham a tomar cerca de 80 a 85% da área útil do cone.

Considerando 85%, temos para o pórtico:

$$A = 0,85 \times 615,44 = 523,12 \text{ cm}^2$$

Apenas para facilitar a abertura do pórtico, vamos fixá-lo em 30 x 18 cm, ou seja, área de:

$$A = 30 \times 18 = 540 \text{ cm}^2 = 0,054 \text{ m}^2$$

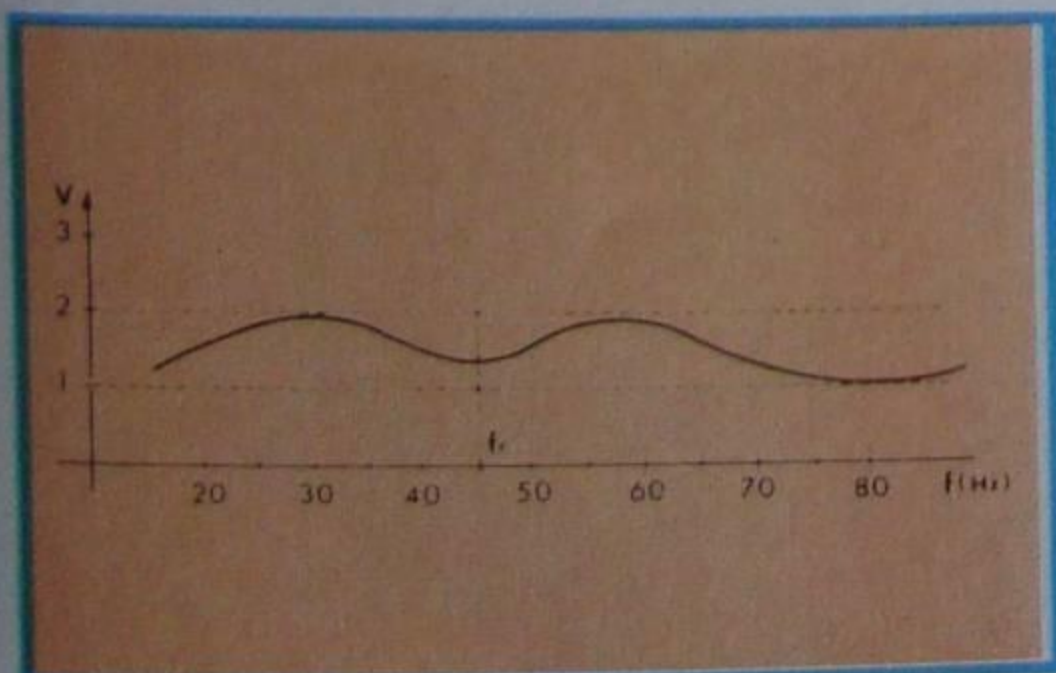
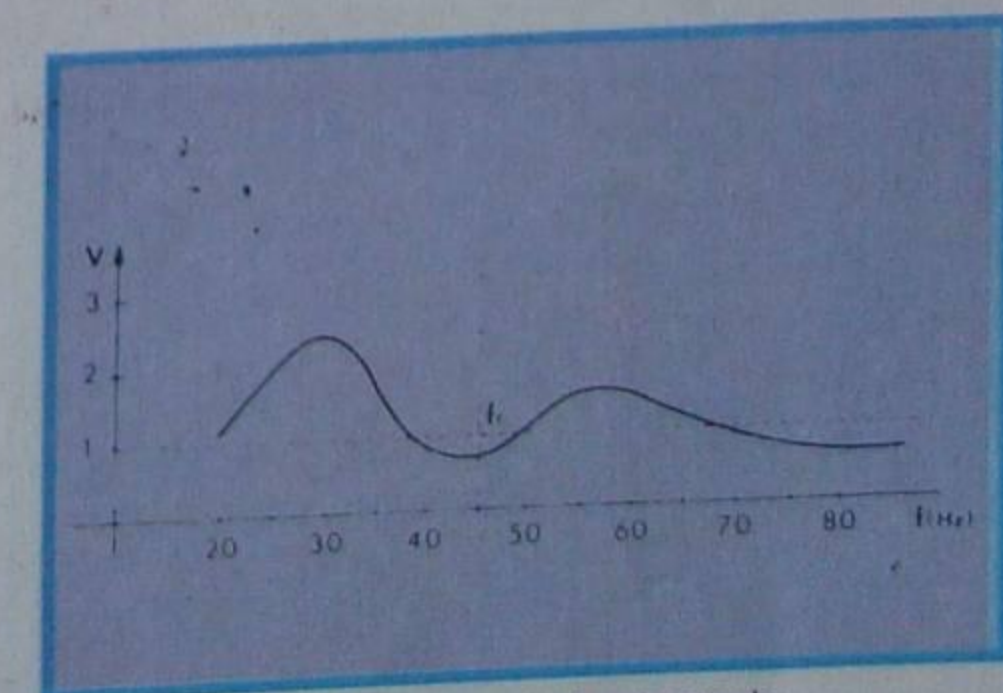



Figura 80 - Curva de resposta inadequada.

Para esse valor, o volume será:

$$V = \frac{2992 \times 0{,}054}{35^2 (0{,}02 + 1{,}13 \sqrt{(0{,}054)}}$$

uma vez que f_r = 35 Hz e a espessura da madeira utilizada admitimos como sendo de 2 cm. Efetuando as contas, teremos:

$$V = \frac{161{,}568}{1\,225 (0{,}02 + 1{,}13 \times 0{,}232379}$$

$$V = \frac{161{,}568}{1\,225 \times 0{,}2825883}$$

$$V = \frac{161{,}568}{346{,}170} = 0{,}46673\ m^3$$

ou: V = 467 litros, aproximadamente.

Como se nota, é uma caixa muito grande.

b) Volume com túnel

Para não alterar o "mérito de qualidade" acústico, devemos manter a mesma área do pórtico e a mesma "indutância acústica" efetiva. Mas o valor dessa indutância será modificado pela introdução do túnel.

Tomemos um túnel de 42,5 cm.

Então, d = 0,425 m e:

$$V = \frac{2\,992\ A}{f_r^2 (d + 1{,}13\ \sqrt{A})}$$

$$V = \frac{2\,992 \times 0{,}054}{35^2 (0{,}425 + 1{,}13 \times \sqrt{0{,}054})}$$

$$V = \frac{2\,992 \times 0{,}054}{1\,225 (0{,}425 + 1{,}13 \times 0{,}232379)}$$

$$V = \frac{161{,}568}{1\,225 (0{,}425 + 0{,}2625883)}$$

$$V = \frac{161{,}568}{1\,225 \times 0{,}6875883}$$

$$V = \frac{161{,}568}{842{,}295} = 0{,}191818\ m^3$$

ou:

V = 192 litros, aproximadamente, valor menor do que a metade do anteriormente calculado.

O volume do túnel será de:

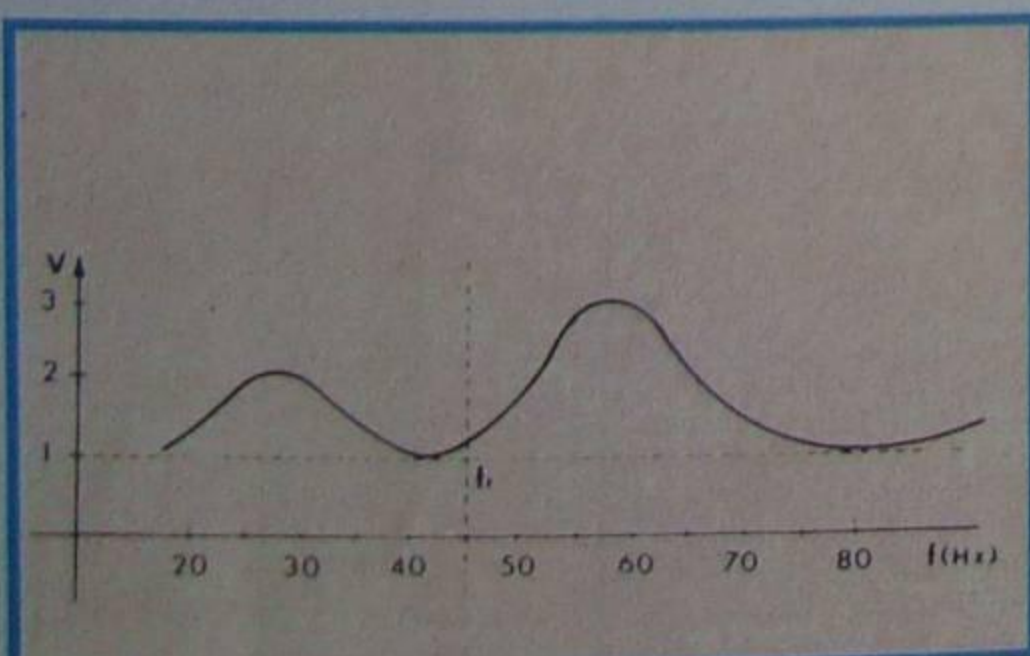



Figura 81 - Curva de resposta inadequada.

$$V_T = A \times d = 540\ cm^2 \times 42{,}5\ cm$$

$$V_T = 22\,950\ cm^3$$

ou, em litros:

$$VT = \frac{22\,950}{1\,000} = 22{,}95\ litros$$

O volume total da caixa será:

V = 192 + 22,95 = 214,95

V = 215 litros

Na **figura 83**, apresentamos a planta de uma caixa-acústica comercial, cujas características são as que tomamos para o exemplo. As dimensões são dadas em polegadas, as quais, transformadas em unidades métricas, confirmarão o nosso cálculo.

Quanto a construção, valem para a caixa com túnel todas as observações que se fizerem para o sonofletor sem túnel.

O ajuste da caixa é comodamente feito construindo-se o túnel com dimensão longitudinal superior à necessária e deixando-o provisoriamente móvel.

Convém começar o ajuste com o túnel no comprimento considerado no cálculo. Faz-se o levantamento da curva "tensão x freqüência" e, a partir daí, verifica-se se está correto ou se há necessidade de modificação. Quando encontrada a posição certa do túnel, corta-se o excesso e efetua-se a fixação definitiva.

VIII - Sistema de alto-falantes

A reprodução sonora é mais perfeita quando proporcionada por alto-falantes especialmente construídos para reproduzir uma determinada faixa do espectro audível. Tais alto-falantes já foram apresentados ao aluno na lição teórica do curso. O reprodutor de graves é conhecido como "woofer", o reprodutor das freqüências médias é conhecido como "medium" ou "mid-range" e o reprodutor de agudos é o "tweeter".

Uma das principais vantagens do sistema acústico de múltiplos alto-falantes está na reprodução mais "limpa", em conseqüência da redução da distorção por intermodulação, que fatalmente existe quando um cone deve vibrar em todas as freqüências.

É prática usual alojar todos os alto-falantes de um sistema no mesmo sonofletor. Neste caso, devem-se tomar os seguintes cuidados:

a) Isolar acusticamente a parte traseira dos alto-falantes reprodutores das freqüências médias e altas, a fim de evitar a intermodulação. Geralmente, os falantes de "mid-range" e "tweeter" têm seu fundo blindado. Caso assim não seja, é necessário providenciar uma caixa fechada para cada um deles.

b) No cálculo do volume da caixa-acústica, devem ser acrescidos os volumes ocupados pelos falantes de médias e altas freqüências, ou de suas respectivas caixas.

c) Embora possam ser colocados em qualquer dos lados do sonofletor, é conveniente, e também mais lógico, que todos os falantes se situem em um mesmo painel.

d) A fixação dos falantes deve ser bastante rígida, para evitar a entrada de ar através deles.

IX - Divisor de freqüências

Como, na maioria dos casos, o amplificador de potência aplica à carga a faixa de áudio completa, é necessário um dispositivo separador que encaminhe a cada alto-falante exclusivamente a parcela de freqüências que ele está apto a reproduzir. Esse dispositivo é chamado de **divisor de freqüências**. O divisor nada mais é que uma rede de filtros LC.

Na **figura 84**, mostramos um divisor de freqüências para duas vias, isto é, dois alto-falantes, e na **figura 85**, um divisor para sistema de 3 vias.

Para que o técnico utilize a rede divisora de freqüências corretamente, deverá estar familiarizado com suas características. As principais são:

a) Impedância

A impedância de entrada da rede corresponde à que ela oferecerá ao amplificador. Ela é medida na mesma freqüência usada para definir a impedância da bobina móvel do alto-falante, ou seja, 400 Hz ou 1 KHz. Fica claro que a rede será a carga do amplificador; conseqüentemente, deverá ter o mesmo valor nominal que ele. É importantíssimo carregar corretamente o amplificador, pois, como o aluno sabe, a potência de saída depende da carga.

b) Freqüência de transição

A freqüência de transição é aquela onde as respostas se cruzam; por isso, também é chamada de freqüência de cruzamento (cross-over). Nessa freqüência, a atenuação é de 3 db; portanto, a potência, nessa freqüência, é a metade da total em cada via. Na **figura 86**, mostramos a freqüência para um sistema de dois alto-falantes; na **figura 87**, para um sistema de 3 falantes. O aluno nota que neste último caso há duas freqüências de cruzamento. Obviamente é indicada em Hertz.

c) Atenuação

Como o nome sugere, indica a diminuição da amplificação. A atenuação é dada em db (decibéis) por oitava. Por exemplo, se o divisor é de 6 db/oitava, isto significa que a amplificação cai à metade (6 db), quando a freqüência dobra (lembre-se de que uma oitava corresponde a dobrar a freqüência). Suponha que o sistema seja de duas vias e que a freqüência de transição seja de 2 000 Hz. Então, a partir daí a potência manejada pelo "woofer" se reduz à metade para 4 000 Hz, a 1/4 para 8 000 Hz, e assim por diante.

Quanto maior a atenuação do

Figura 82 - Exemplo de duto.

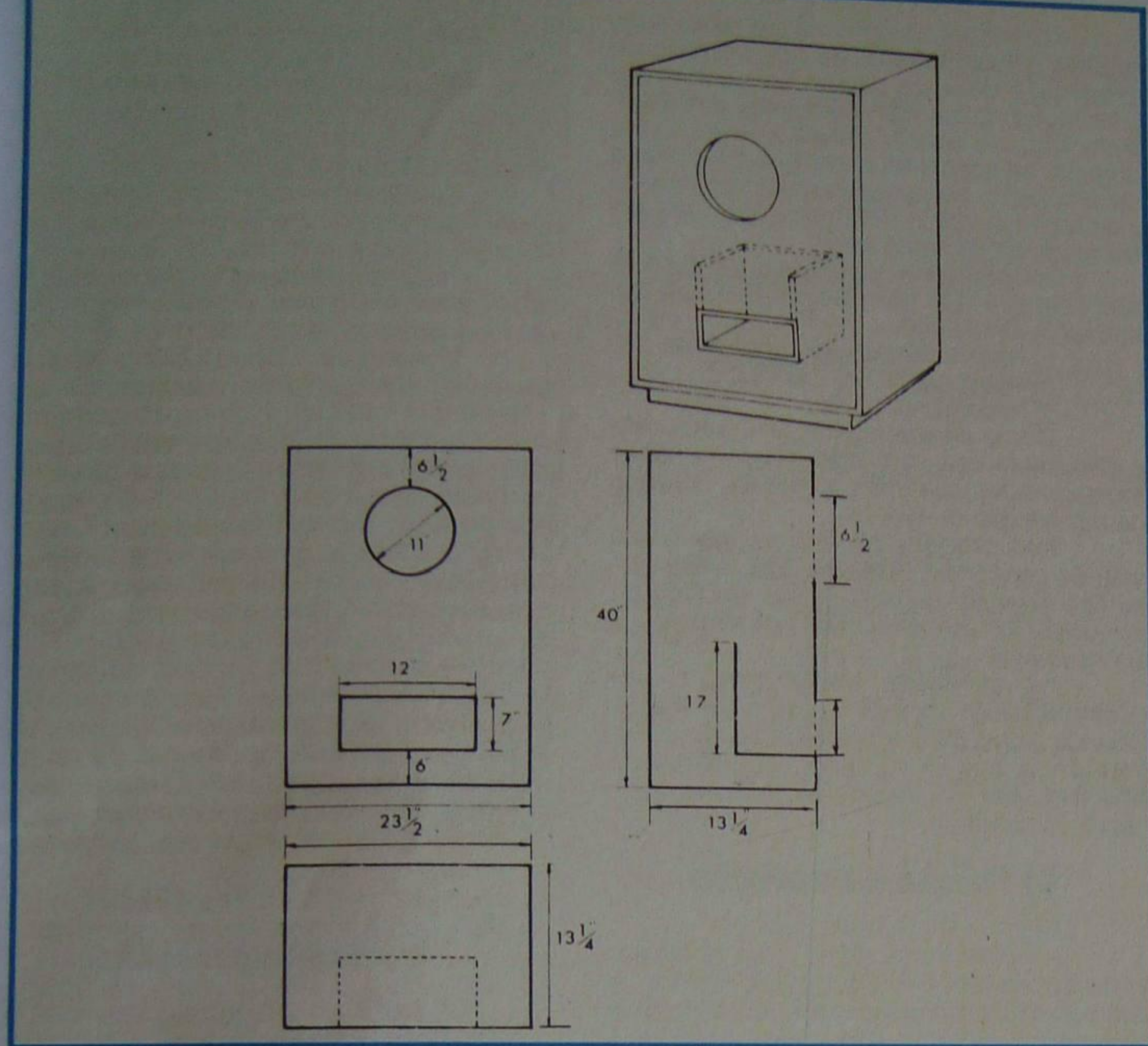



Figura 83 - Planta da caixa usada como exemplo.

divisor de freqüências, melhor, pois isto significa que o "corte" é mais abrupto. Entretanto, filtros de corte muito rápido são bastante complexos e, na prática, costuma-se usar divisores de 6 ou 12 db/oitava. Aquele que mostramos na figura 86 é do tipo de 12 db/oitava e o da figura 87 é de 6 db/oitava.

d) Perdas

Como os divisores são constituídos por capacitores e indutores reais, sempre apresentam perdas. Essas perdas devem ser minimizadas para que parte da potência de áudio não seja transformada em calor. Diminuem-se as perdas utilizando indutores com núcleo de ar enrolado com fio de pequena resistência e capacitores de pequena tolerância.

As perdas são indicadas em decibéis e um bom divisor tem perda geralmente menor do que 0,2 db, o que corresponde a menos de 5 %.

X - Cálculo de um divisor de freqüências

A título de ilustração, vamos mostrar ao aluno como se calcula um divisor de freqüências de duas vias, como o mostrado anteriormente. Esse divisor é um dos mais utilizados na prática.

Inicialmente, devemos conhecer a freqüência de transição e a impedância da bobina móvel dos dois alto-falantes, a qual deve ser do mesmo valor, que, por sua vez, deve coincidir com a impedância de saída do amplificador.

Quanto a freqüência de transição, ela não costuma ser indicada pelo fabricante de alto-falantes; todavia, conhecendo-se a faixa de resposta dos dois alto-falantes, é fácil escolhê-la.

Suponhamos então que se disponha de um "woofer", cuja faixa de resposta se estende de 35 Hz a 6 000 Hz, e de um "tweeter", cuja faixa é de 2 200 Hz a 16 000 Hz, ambos com impedância de 8 Ω.

Analisando as duas faixas de resposta, vemos que elas se sobrepõem entre 2 200 Hz e 6 000 Hz. Evidentemente, a freqüência de transição deve localizar-se nesse intervalo.

A freqüência média desse intervalo é:

$$\frac{2\,200 + 6\,000}{2} = \frac{8\,200}{2} = 4\,100 \text{ Hz}$$

Portanto, escolhamos 4 000 Hz como a freqüência de transição.

De posse desses dados, podemos determinar as indutâncias e capacitâncias do filtro. De acordo com a figura 84, chamamos de L_W a indutância que bloqueia as freqüências altas, impedindo-as de penetrar no "woofer". Foi chamado de C_W o capacitor de contorno do "woofer", isto é, o capacitor que deriva as freqüências altas para o "tweeter". Do mesmo modo, chamamos de L_T o indutor de contorno do "tweeter" e de C_T o capacitor que dá passagem às freqüências altas e bloqueia as baixas.

Segundo a teoria dos filtros, esses componentes são determinados pelas expressões:

$$L_W = \frac{R_o}{2\pi f_t} \quad \text{e} \quad L_T = \frac{R_o}{3{,}2\pi f_t}$$

$$C_W = \frac{0{,}8}{\pi R_o f_t} \quad \text{e} \quad C_T = \frac{1}{2\pi R_o f_t}$$

Como, em nosso exemplo, $R_o = 8\ \Omega$ e $f_t = 4\,000$ Hz, resulta:

$$L_W = \frac{8}{2 \times 3{,}14 \times 4\,000} = \frac{8}{25\,120}$$

$$L_W = 0{,}0003185 \text{ H}$$

$$L_W = 318{,}5\ \mu\text{H}$$

$$L_T = \frac{8}{3{,}2 \times 3{,}14 \times 4\,000} = \frac{8}{40\,192}$$

$$L_T = 0{,}000199 \text{ H}$$

$$L_T = 199\ \mu\text{H}$$

$$C_W = \frac{0{,}8}{3{,}14 \times 8 \times 4\,000} = \frac{0{,}8}{100\,480} \text{ F}$$

$$C_W = \frac{0{,}8}{100\,480} \times 1\,000\,000\ \mu\text{F}$$

$$C_W = \frac{800\,000}{100\,480} = 7{,}96\ \mu\text{F}$$

$$C_T = \frac{1}{2 \times 3{,}14 \times 8 \times 4000}$$

$$C_T = \frac{1}{200\,960} \text{ F}$$

$$C_T = \frac{1 \times 1\,000\,000}{200\,960}\ \mu\text{F} = 4{,}97\ \mu\text{F}$$

Para os capacitores, adotam-se os valores comerciais de 10 μF e 4,7 μF. A tensão de isolação dependerá da potência do amplificador.

Suponhamos que esta última seja de 50 W eficazes. Como a carga é de 8 Ω,

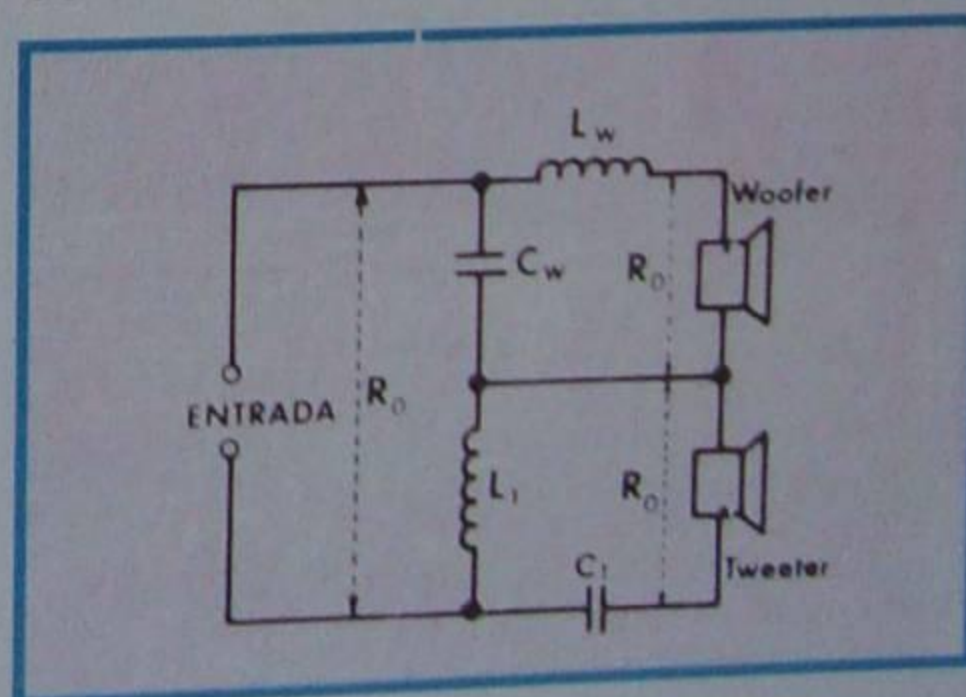



Figura 84 - Divisor para 2 canais.

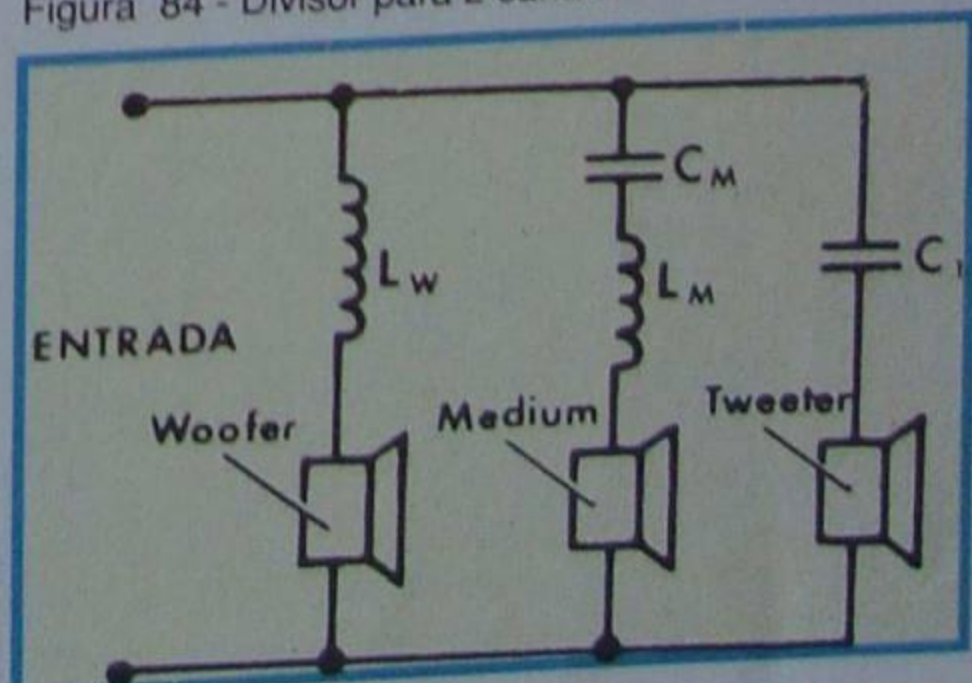



Figura 85 - Divisor para 3 canais.

a tensão eficaz será:

$$V = \sqrt{R.P} = \sqrt{8 \times 50} = \sqrt{400} = 20\ V$$

Em valor máximo:

$$V_{max} = 1{,}41 \times V_{ef} = 1{,}41 \times 20 = 28{,}2\ V$$

Adota-se 50 V para isolação dos capacitores.

Como os capacitores devem dar passagem à tensão de freqüência variável, costuma-se empregar capacitores **não polarizados**, ou dois polarizados ligados em série (neste caso, deve ter o dobro do valor calculado) e com os terminais de mesma polaridade unidos. Esta prática, entretanto, está sendo abandonada, uma vez que os capacitores eletrolíticos polarizados atuais apresentam baixa perda e não causam deformação na resposta. O cuidado que se deve ter é quanto ao valor da capacitância, que deve ser medida individualmente, uma vez que a tolerância do eletrolítico polarizado costuma variar entre - 30 a + 50%.

Os indutores devem ser construídos com fio esmaltado de grande diâmetro (fio nº 18 AWG ou menor), em fôrma de uma ou mais polegadas e com núcleo de ar. Para o cálculo do número de espiras, o aluno deve consultar a lição correspondente.

Uma vez terminado o filtro, para melhor apresentação, seus componentes podem ser alojados em uma pequena caixa ou em placa de circuito impresso. Logicamente, os terminais de ligação devem ficar acessíveis pelo lado externo da caixa, como mostrado na **figura 88**. Na **figura 89**, ilustramos a prática, mostrando um divisor de freqüências comercial. Este tipo de divisor possui, como recurso, chaves seletoras que permitem a comutação de um circuito atenuador resistivo como mostrada na **figura 90**, sendo este atenuador um divisor de tensão.

Para encerrarmos esta parte ilustramos, na **figura 91**, detalhes construtivos de caixas-acústicas sugeridas pela Novix, para divisores de 2 a 3 canais, cujas dimensões podem ser vistas na **Tabela I.**

XI - Cornetas

Como foi citado no início desta lição prática, os sonofletores do tipo **corneta** ou **trombeta** diferem daqueles do tipo de irradiação direta apresentados até aqui, pelo fato de que a carga acústica, na corneta, se acopla ao diafragma da unidade de excitação, ao passo que no sistema de irradiação direta o diafragma (cone) está acoplado diretamente ao ar.

As principais vantagens da corneta em relação ao sonofletor do tipo de irradiação direta são:

a) amplo alcance de freqüência;
b) ausência de transientes;
c) maior rendimento.

Como desvantagens, podemos citar a dificuldade de construção e as dimensões muito grandes, quando a corneta é utilizada na reprodução de graves.

Nos grandes auditórios, tais como sala de concertos, cinemas, etc., onde não se faz objeção quanto às dimensões do sonofletor, o uso de cornetas é aconselhável.

As cornetas tanto podem ser construídas de madeira, como de metal. Quando adequada à reprodução de baixa freqüência usa-se madeira; quando à de alta freqüência (tweeters), emprega-se estrutura de metal.

1) Forma da corneta

A corneta apresenta uma abertura, onde se instala a unidade excitadora, e outra abertura maior por onde é irradiado o som para o exterior. A primeira abertura é chamada de **garganta** e a segunda, de **boca**. A distância entre a garganta e a boca constitui o **comprimento** ou **extensão** da corneta. O comportamento da corneta nas baixas freqüências depende, em parte, da forma da corneta. As formas mais comuns são: cônica, hiperbólica e exponencial. Na **figura 92**, mostramos o corte de uma corneta exponencial.

A trombeta para reprodução de baixa freqüência requer extensão muito grande. Em conseqüência do exposto, ou seja, da exagerada dimensão exigida pela corneta de baixa freqüência, ela não é muito usada na sonorização de pequenos ambientes. Em compensação, é amplamente empregada na reprodução de altas freqüências. O aluno deve ter observado que quase todo "tweeter" de boa qualidade é composto de uma unidade de excitação acoplada a uma corneta, geralmente metálica ou de plástico.

Como se afirmou anteriormente, a forma preferida pelos projetistas de cornetas é a exponencial.

O dimensionamento da corneta é relativamente simples, embora requeira o conhecimento de logaritmos.

Inicialmente, deve-se fixar a área da garganta. Se a unidade excitadora é um alto-falante comum, a área da garganta deve ser menor do que a do cone. O alto-falante deve ficar em caixa totalmente fechada e na qual se fará um rasgo (garganta), formando assim um filtro acústico. Quando a unidade excitadora é comercial, a área da garganta já está definida pelo seu fabricante.

A fixação da área da boca da corneta é feita em função da menor freqüência que se deseja reproduzir. Costuma-se tomar o diâmetro da boca igual a 1/2 ou 1/3 do comprimento de onda. Considerando a velocidade do som igual a 340 m/s (34 000 cm/seg) e diâmetro igual a 1/2 de λ (comprimento de onda), resulta:

$$d_b = \frac{1}{3} . \lambda = \frac{1}{3} . \frac{V}{f_c} = \frac{34\,000}{3\,f_c}\ cm$$

A partir do diâmetro, calcula-se a área da boca pela expressão:

$$S_b = \frac{\pi\, d_b^2}{4}$$

Esta área, evidentemente, corresponde à de um círculo de diâmetro d_b; entretanto, ela pode ter qualquer forma, desde que se conserve o valor.

Isto posto, determina-se o comprimento da corneta pela expressão:

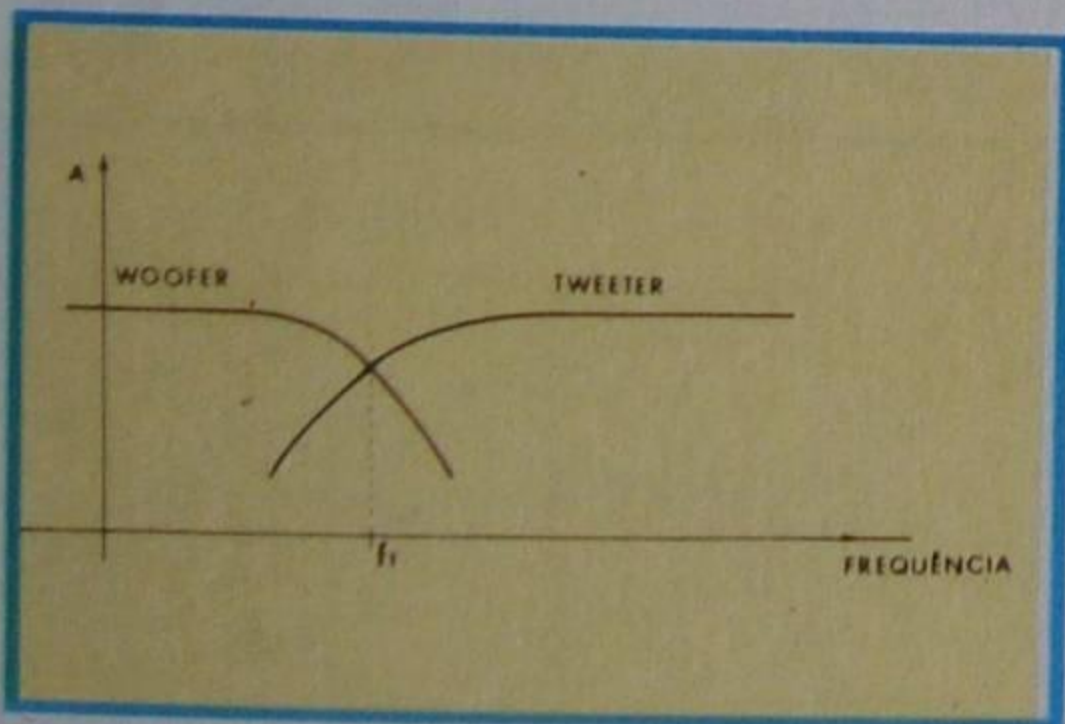



Figura 86 - Cross-over para 2 canais.

Figura 87 - Cross-over para 3 canais.

Figura 88 - Terminais de entrada.

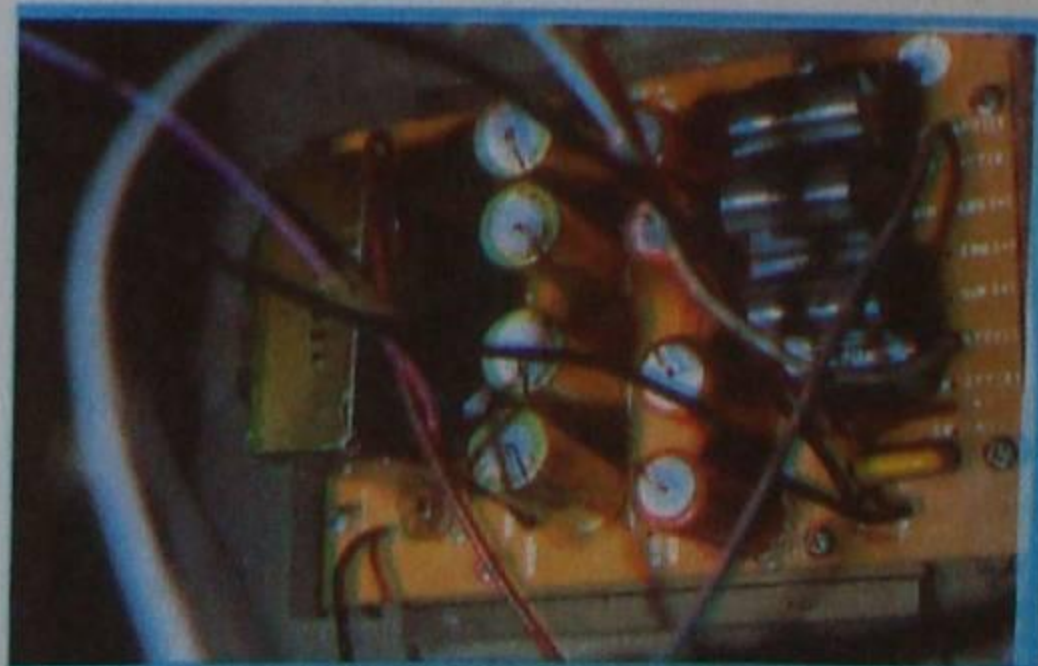



Figura 89 - Divisor de freqüências.

Figura 90 - Atenuador resistivo.

Figura 91 - Detalhes de caixas acústicas.

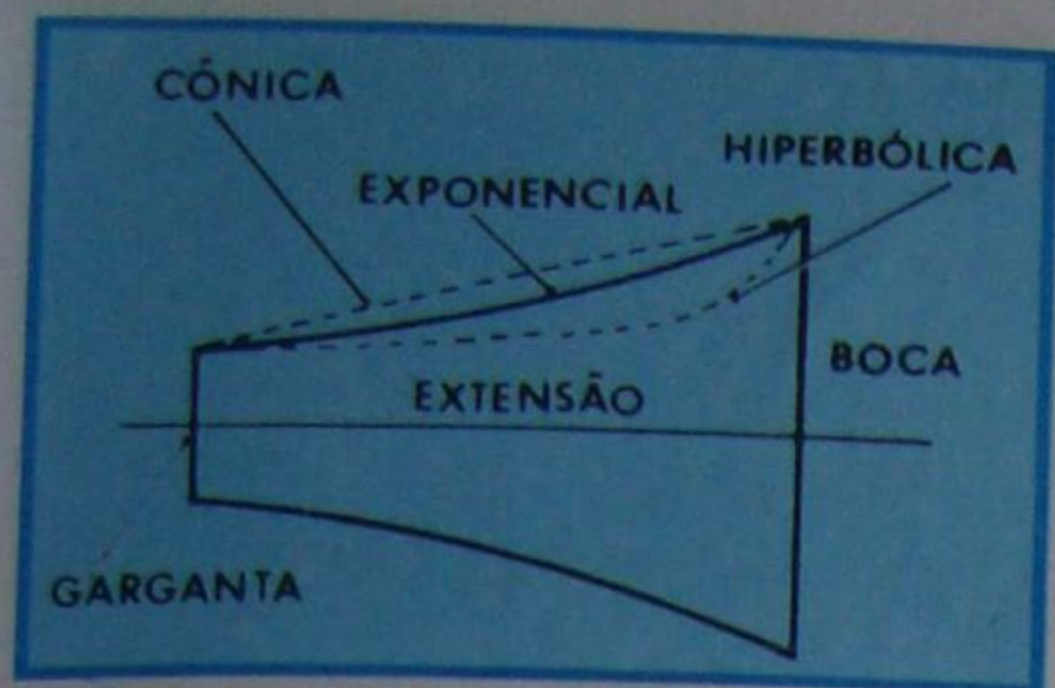



Figura 92 - Corneta exponencial.

$$l = 0{,}183\,\lambda\ [\log S_b - \log S_g]$$

onde λ é o comprimento de onda, S_b a área da boca e S_g a da garganta. Nesta expressão, as áreas devem ser consideradas na mesma unidade de medida, sendo mais prático tomar o cm². Se λ for tomado em centímetros, resultará l também em centímetros. Se for tomado em metros, o resultado de l também será em metros.

A título de exercício, vamos determinar os elementos de uma corneta para reprodução de freqüências altas. Suponhamos que a unidade excitadora tenha garganta de 1,9 cm de diâmetro e freqüência de corte de 1 500 Hz.

Solução:

a) Área da garganta:

$$S_g = \frac{\pi \cdot d_g^2}{4}$$

$$S_g = \frac{3{,}14 \times (1{,}9)^2}{4}$$

$$S_g = \frac{3{,}14 \times 3{,}61}{4}$$

$$S_g = \frac{11{,}3354}{4}$$

$$S_g = 2{,}8338\ \text{cm}^2$$

b) Área de boca:

$$d_b = \frac{34\,000}{3f_c}$$

$$d_b = \frac{34\,000}{3 \times 1\,500}$$

$$d_b = \frac{340}{45}$$

$$d_b = 7{,}555\ \text{cm}^2$$

$$S_b = \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = \frac{3{,}14 \times (7{,}555)^2}{4} =$$

$$= \frac{3{,}14 \times 57{,}08642}{4} = \frac{179{,}2513588}{4}$$

$$S_b = 44{,}8128\ \text{cm}^2$$

c) Comprimento:

$$l = 0{,}183\,\lambda\ [\log S_b - \log S_g]$$

$$\lambda = \frac{34\,000}{f_c} = \frac{34\,000}{1\,500} = 22{,}66\ \text{cm}$$

Como S_b = 44,8128 e S_g = 2,8338, segue-se que:

$$\log S_b = \log 44{,}8128 = 1{,}6514$$

$$\log S_g = \log 2{,}8338 = 0{,}4523$$

Portanto, substituindo todos os valores na fórmula de l, resulta:

$$l = 0{,}183 \times 22{,}66\ [1{,}6514 - 0{,}4523]$$

$$l = 0{,}183 \times 22{,}66 \times 1{,}1991$$

$$l = 4{,}97403898$$

$$l = 5{,}0\ \text{cm, aproximadamente}$$

Como o aluno percebe, a corneta para as condições propostas, condições essas que correspondem às de um "tweeter", tem dimensões bastante cômodas. A execução da corneta exponencial é que apresenta dificuldades em razão da peculiaridade da curva exponencial. Para facilitar, costuma-se calcular os pontos sobre o eixo da corneta onde a área é duplicada em relação ao valor anterior. Assim, tomando-se S_g (área da garganta) como partida, calcula-se a distância de S_g onde a área se dobrará. Considerando-se o dobro da distância, a área quadruplicará; ao triplo da distância a área octoplicará e assim por diante. Na **figura 93**, mostramos o que se explicou.

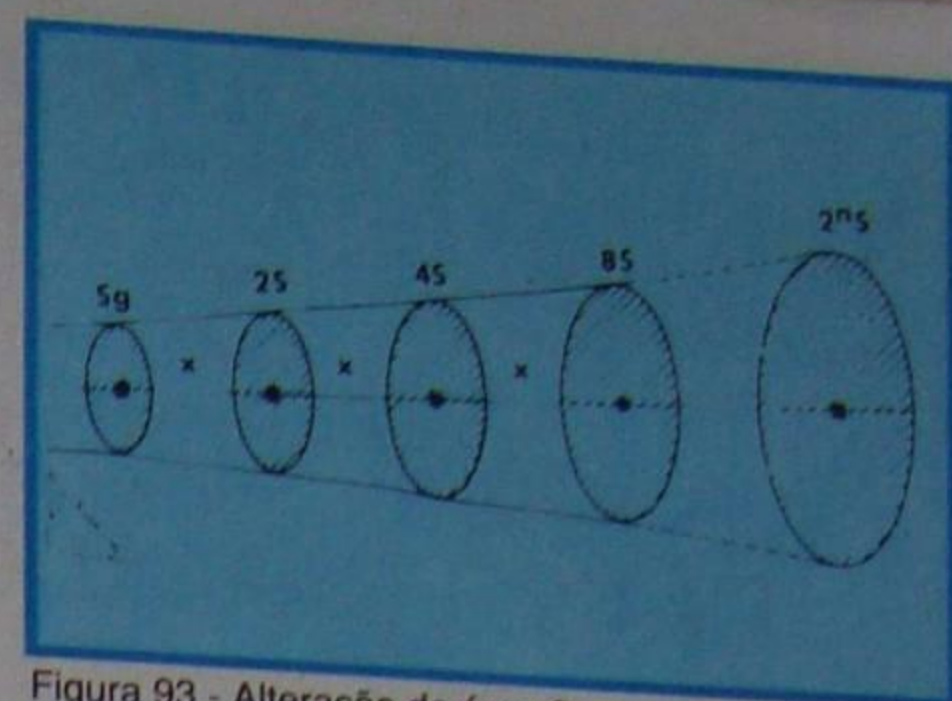



Figura 93 - Alteração da área S_g.

O valor de **x**, ou seja, da distância entre duas áreas consecutivas que obedeçam à formação citada, pode ser calculado pela expressão:

$$x = 0{,}055\,\lambda$$

Assim, em nosso exemplo, teremos:

$$x = 0{,}055 \times \frac{34\,000}{1\,500} = 1{,}245\ \text{cm}$$

ou seja, 1,245 cm a partir da área da garganta, teremos área igual a 2 S_g; avançando mais 1,245 cm, teremos 4 S_g e assim por diante.

Se desejarmos saber quantas vezes a àrea é dobrada para atingir o valor da área da boca, bastará dividir o comprimento da corneta por x, ou seja:

$$n = \frac{l}{x}$$

Em nosso exemplo:

$$n = \frac{5}{1{,}245} = 4$$

Observação: As fórmulas apresentadas para o cálculo da corneta exponencial reprodutora de agudos valem também para a reprodutora de graves; entretanto, o aluno pode verificar facilmente que, ao abaixar a freqüência de corte a valores inferiores a 100 Hz, as dimensões tornam-se exageradas.

Para Sistemas	Nº de Canais	Dimensões da Caixa			Centro do Furo do Woofer		Centro do Furo do Midrange		Centro do Furo do Tweeter		Centro do Furo do Duto		Centro do Furo do Divisor		Diâmetro do Woofer	Diâmetro do Midrange	Diâmetro do Tweeter	Diâmetro do Duto	Furo do Divisor		Profundidade do Duto
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Adagio 6"	2	220	390	155	110	150			313	110	50	54	120	110	147		76	51	80	70	50
Compacto 8"	2	270	500	195	135	170			370	135	50	70	120	135	185		76	51	80	70	75
Compacto 8"	3	300	510	210	150	170	357	56	76	62	312	90	120	150	185	122	76	76	80	70	50
Musicale 10"	2	328	510	225	164	177			426	164	64	80	120	164	233		76	76	80	70	125
Musicale 10"	3	320	590	235	160	160	375	60	100	44	375	82	120	160	233	122	76	76	80	70	80
Clássico 12"	3	370	650	290	185	190	425	80	87	43	425	85	120	185	280	122	76	102	80	70	80
Concerto 15"	3	450	735	325	225	234	525	92	76	63	525	95	120	210	352	122	76	127	80	70	150

Tabela I - Dimensões das caixas acústicas propostas pela Novik.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA
RÁDIO - TV
12ª LIÇÃO ESPECIAL
CIRCUITOS INTEGRADOS (2ª PARTE)
TRANSFORMADORES DE AUDIOFREQÜÊNCIA (1ª PARTE)

VI - Aplicações de CI

Como já se explicou, os tipos básicos de circuitos integrados são os digitais e os lineares. Os primeiros são largamente utilizados em aplicações digitais (calculadoras, relógios, etc.) e os segundos, em aplicações especiais. Além desses, também foram projetados circuitos integrados mistos, para aplicações digital e linear, simultaneamente.

Nos exemplos de aplicação que daremos em seguida, não nos reportaremos a circuitos digitais, pois isto implicaria conhecimentos de lógica digital, (álgebra de Boole), que divergem da finalidade de nosso curso.

O aluno se recorda de que no projeto de um circuito com componentes discretos, há necessidade de escolher os valores dos componentes, satisfazendo as especificações dos componentes ativos em função do fim desejado. Por exemplo, se desejarmos projetar um amplificador de potência de áudio, teremos de escolher os transistores de saída, de acordo com a potência desejada; escolher o ponto de funcionamento desses transistores em função da tensão de alimentação e da potência de dissipação; escolher os capacitores de acoplamento e derivação de emissor, para obter as faixas de resposta que desejamos; etc. Na aplicação do circuito integrado, esse processo não pode ser seguido, pois o circuito já está inteiramente montado e o técnico somente tem acesso aos terminais de entradas e saídas indicados pelo fabricante do circuito.

O fabricante do circuito indica o diagrama interno, as tensões externas que se podem aplicar e como essas tensões modificam o comportamento do circuito. Além disso, o fabricante indica a aplicação típica do circuito através de esquemas de utilização. Isto não significa que o circuito integrado tenha só aquela aplicação; muitas outras podem ser descobertas pela imaginação e conhecimento do projetista.

Como exemplo de aplicação de um circuito integrado apresentamos na **figura 12**, o esquema interno do circuito integrado STK 441 da Sanyo. Este circuito integrado contém dois amplificadores de potência idênticos, dotados de entradas diferenciais, possibilitando o desenvolvimento de um amplificador estereofônico de excelentes características, compacto e de custo compativo com similar de componentes discretos.

As características principais do amplificador são mostradas na **TABELA I.**

O circuito esquemático da montagem está indicado na **figura 13.**

Trata-se de uma variante da configuração básica recomendada pelo fabricante, a qual fornece, como dito anteriormente, um excelente desempenho.

A aparência física do STK 441 pode ser vista na **figura 14.** Quanto à sugestão de lay-out de placa, o aluno pode vê-la nas **figuras 15 e 16** nas quais encontram-se ilustradas respectivamente, a face dos componentes e o lado cobreado.

Para o circuito proposto, a lista de materiais é a mostrada na **TABELA II.** O amplificador após concluído, adquire a aparência similar à da **figura 17**

O exemplo de aplicação dos CIs que apresentamos foram escolhidos em função de sua simplicidade, pois trata-se de circuitos de áudio, conseqüentemente de baixa freqüência. Atualmente, existem

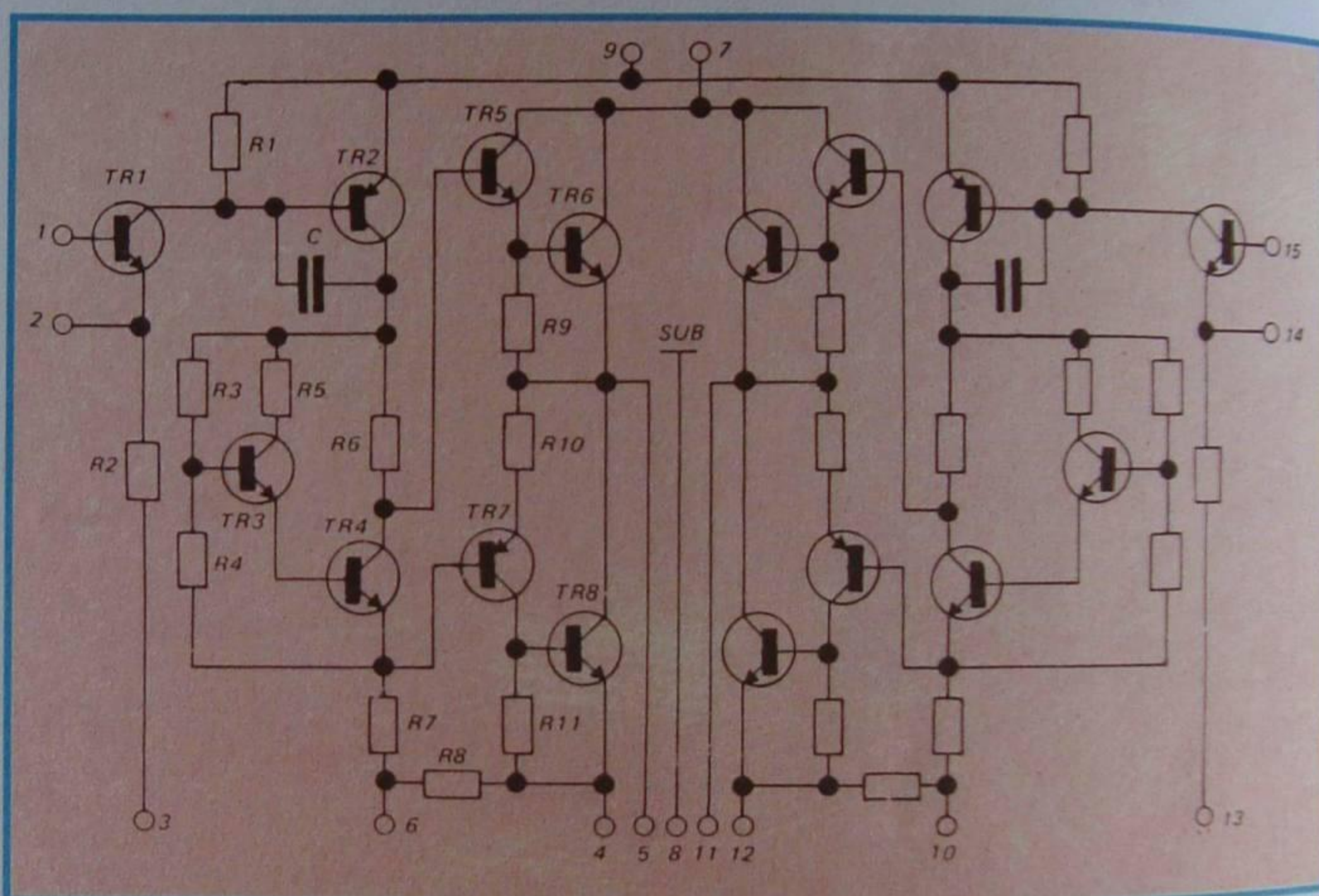



Figura 12 - Esquema interno do STK 441.

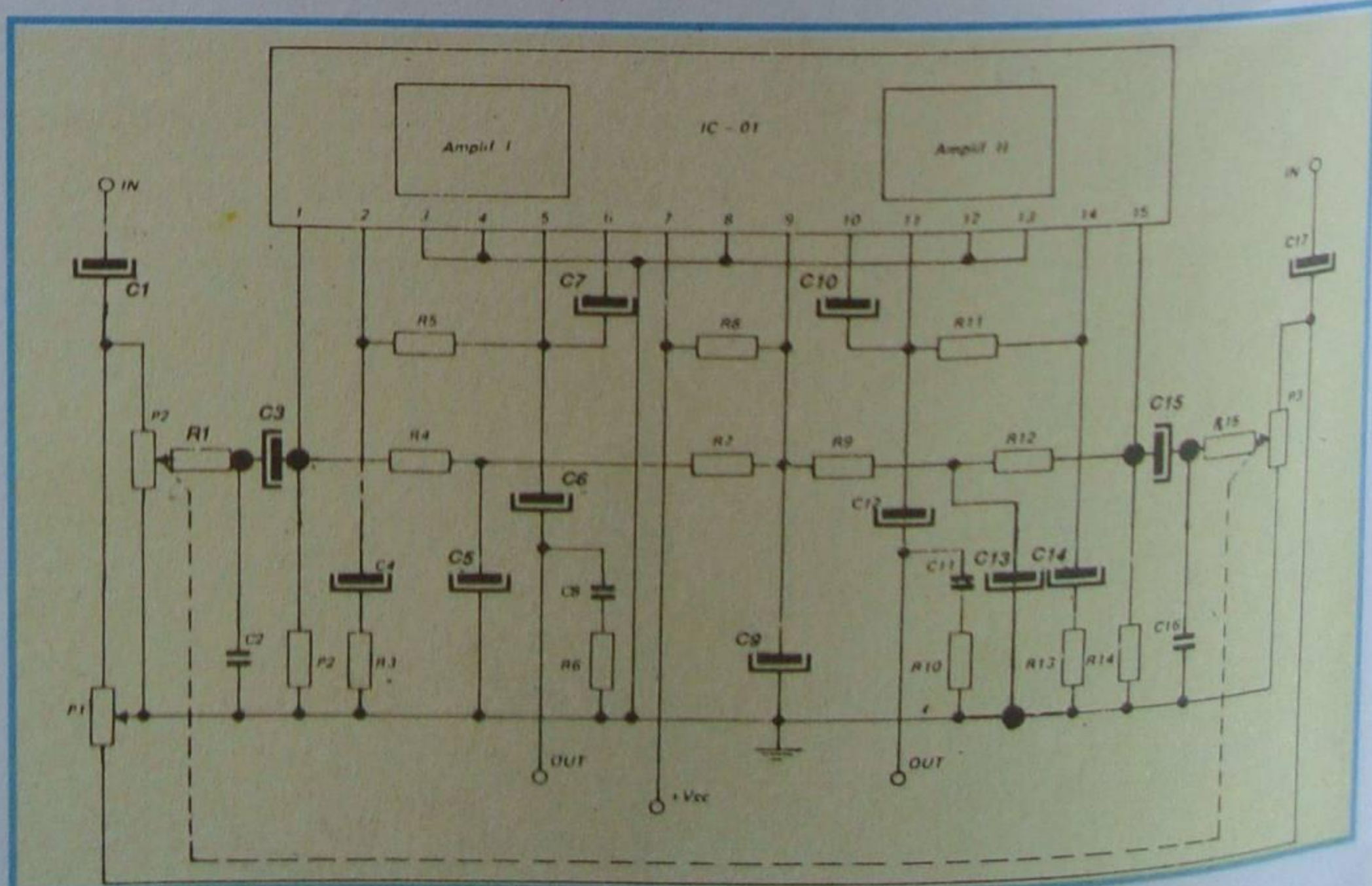



Figura 13 - Sugestão de aplicação.

Características – Série STK 430	STK 441
Máxima Vcc	63
Tc máx.	85
Tensão recomendada de alimentação RL = 8 ohms	44
Tensão recomendada de alimentação RL = 4 ohms	40
Ganho (laço fechado)	26-45
Po máx. p/ RL = 8 ohms (THD = 1%)	20
Po máx. p/ RL = 4 ohms (THD = 1%)	24
PBW (3dB) min	30-20k

Tabela I - Características.

Figura 14 - Aparência física do STK 441.

circuitos integrados lineares, desenvolvidos para as mais diversas aplicações, cuja complexidade interna e dos componentes externos que a eles se interligar depende da natureza da função que o circuito deve efetuar. Por exemplo, um CI desenvolvido para demodulação de cores

LISTA DE MATERIAIS – STK – 441

Código dos componentes	Quant.	Especificações dos componentes
R1	01	Resistor 1KΩ × 1/8W
R2	01	Resistor 220KΩ × 1/8W
R3	01	Resistor 120Ω × 1/8W
R4	01	Resistor 390KΩ × 1/8W
R5	01	Resistor 12KΩ × 1/8W
R6	01	Resistor 4,7Ω × 1/8W
R7	01	Resistor 220KΩ × 1/8W
R8	01	Resistor 100Ω × 1/8W
R9	01	Resistor 220KΩ × 1/8W
R10	01	Resistor 4,7Ω × 1/8W
R11	01	Resistor 12K × 1/8W
R12	01	Resistor 390K × 1/8W
R13	01	Resistor 120Ω × 1/8W
R14	01	Resistor 220KΩ × 1/8W
R15	01	Resistor 1KΩ × 1/8W
P1	01	Potenciômetro simples 100K lin.
P2 e P3	01	Potenciômetro duplo 100K lin.
C1	01	Capacitor eletrolítico 1μF × 35V
C2	01	Capacitor cerâmico 470pF
C3	01	Capacitor eletrolítico 1μF × 35V
C4	01	Capacitor eletrolítico 220μF × 25V
C5	01	Capacitor eletrolítico 10μF × 35V
C6	01	Capacitor eletrolítico 1000μF × 35V
C7	01	Capacitor eletrolítico 47μF × 25V
C8	01	Capacitor cerâmico 100nF × 100V
C9	01	Capacitor eletrolítico 100μF × 63V
C10	01	Capacitor eletrolítico 47μF × 25V
C11	01	Capacitor cerâmico 100nF × 100V
C12	01	Capacitor eletrolítico 1000μF × 35V
C13	01	Capacitor eletrolítico 10μF × 35V
C14	01	Capacitor eletrolítico 220μF × 25V
C15	01	Capacitor eletrolítico 1μF × 35V
C16	01	Capacitor cerâmico 470pF
C17	01	Capacitor eletrolítico 1μF × 35V
IC-01	01	STK 441
	02m	Fio blindado
	01m	Fio vermelho
	01m	Fio preto
	01m	Solda
	02	Conector duplo RCA fêmea
	01	Placa de Circuito Impresso
	01	Dissipador de calor 18 × 8 cm (Dimensões mínimas)

Tabela II - Materiais.

Figura 15 - Lay-out - face dos componentes.

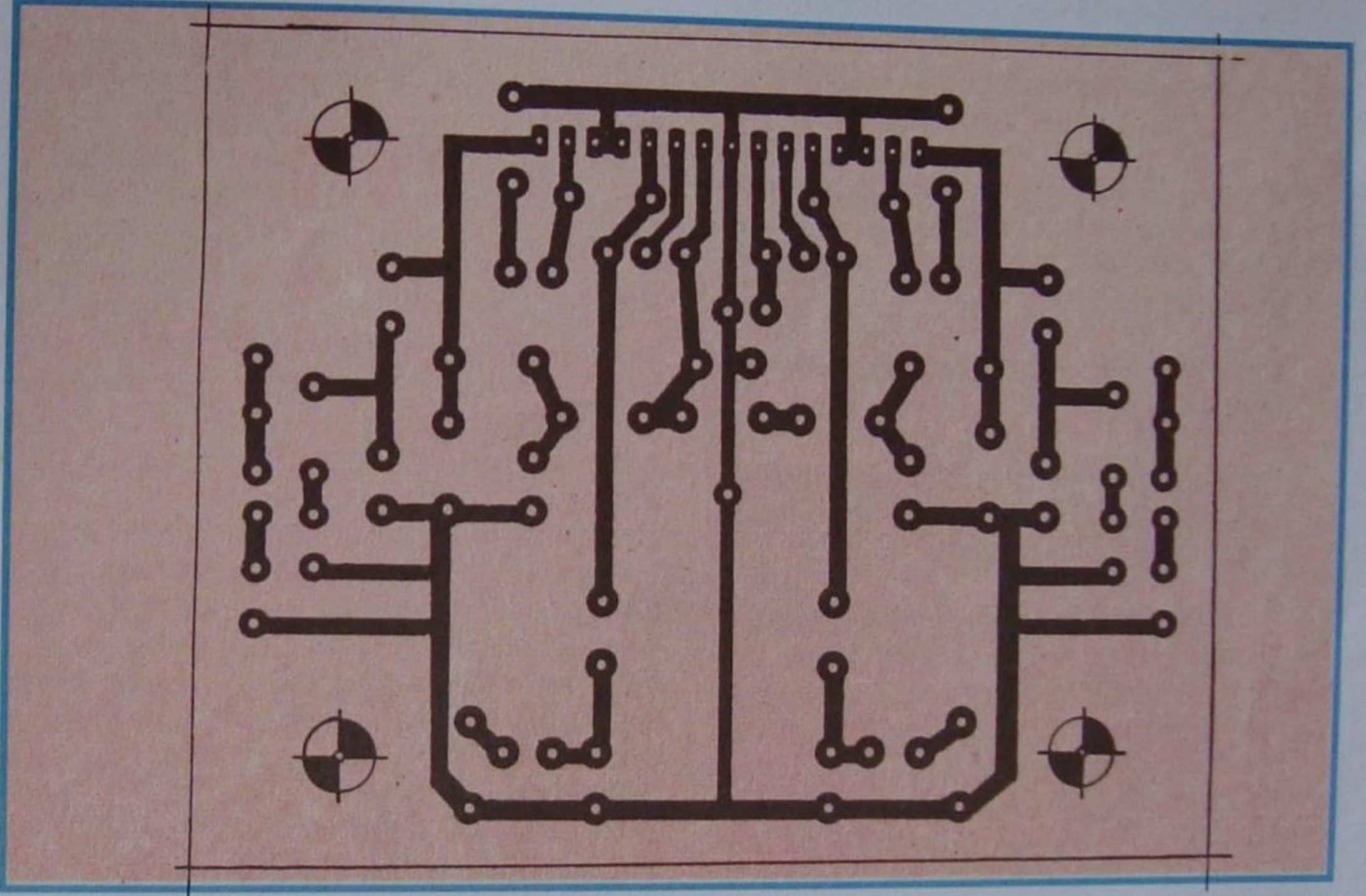



Figura 16 - Lay-out - face cobreada.

em TV cromática não pode ter a simplicidade de um amplificador de áudio, além de que os componentes discretos que a ele se ligarão serão bem mais numerosos e críticos. De qualquer maneira, o fabricante do circuito integrado fornecerá os dados e características não

Figura 17 - Montagem.

só do CI, como dos demais componentes.

Para encerrar estas rápidas noções sobre CI, é interessante lembrar ao aluno que o técnico deve considerar o circuito integrado, do ponto de vista da manutenção, como se ele fosse um componente discreto, como um transistor, por exemplo. A verificação do estado de um CI no circuito é tarefa que exige, além de conhecimento, instrumentos especiais. Um defeito interno, em qualquer parte do CI, inutiliza-o. As medidas das tensões de alimentação, tensões de entrada e saída, forma de onda, etc., devem ser efetuadas com aparelhos adequados, exatamente como se faria para um circuito comum, em se tratando de CIs lineares. Em circuitos digitais, essas medidas, e principalmente a observação da forma de onda, não teriam grande significado; por isso, é necessário o

emprego de instrumentos especiais, como pulsadores, pontas de prova, comparadores etc., adequados ao serviço.

TRANSFORMADORES DE AUDIOFREQÜÊCIA

I - Generalidades

Vimos em lições do curso, que nem sempre um único dispositivo, o transistor, é suficiente para elevar o nível de um sinal ao valor adequado à sua utilização. Por exemplo, se aplicarmos o sinal de 1 mV de um microfone dinâmico à entrada de um transistor que o amplifique 200 vezes, recolheremos na saída 200 mV, que, ainda assim, são insuficientes para fazer vibrar o cone de um alto-falante. Para aumentar ainda mais o sinal de entrada, é necessário que associemos em série dois ou mais circuitos amplificadores, que chamamos de estágios amplificadores. A ligação entre estágios é chamada de **acoplamento**.

Para que a transferência de energia de um estágio para outro seja a mais eficiente possível, é necessário que se cumpram duas condições:

1ª) que não haja perdas excessivas no acoplamento;

2ª) que a impedância de entrada do estágio acoplado seja igual à impedância de saída do estágio acoplador.

A primeira condição não é difícil de se conseguir, pois bastaria ligar os estágios diretamente entre si, por exemplo, mas a segunda condição normalmente não se cumpre, porque os dispositivos amplificadores, como transistores, têm impedância de saída diferente da de entrada e não podem ser ligados diretamente.

Pois bem, o dispositivo que cumpre razoavelmente bem as duas condições é um **transformador**, pois suas perdas podem tornar-se bem pequenas, e ele permite adaptar as impedâncias, como mostraremos adiante.

Para que o aluno sinta melhor a extensão do problema do acoplamento, vamos considerar uma situação muito comum, que é aquela de ligar o alto-falante à saída de um transistor. Admitamos que se tenha um transistor e se deseja ligar a ele um alto-falante, cuja impedância é baixa, sempre da ordem de uns poucos ohms. Admitamos que seja de 4 Ω. Efetuando os cálculos da etapa transistorizada, verificamos que a impedância de saída, chamada na prática de **resistência de carga**, é de alguns milhares de ohms. Ora, é fácil compreender que não podemos ligar o alto-falante diretamente no coletor do transistor, como mostramos na **figura 1**, porque o transistor trabalharia com resistência de carga muito abaixo do valor especificado e, em conseqüência, sobreviria perda de potência muito grande, além de outras implicações. A solução, no caso, é ligar a carga através de um dispositivo que faça o transistor "enxergar" a impedância do alto-falante, como se ela tivesse o valor ôhmico desejado. Esse dispositivo é o **transformador de saída** que, na realidade, é um adaptador de impedâncias. Sua ligação é a que mostramos na **figura 2.** Como se pode observar nessa figura, o primário do transformador de saída é a impedância de carga do transistor, e sua reatância (resistência à corrente alternada) pode ser escolhida de acordo com a necessidade do transistor. Pelo primário passarão a corrente contínua, que é aquela de alimentação do coletor, e a corrente alternada de audiofreqüência, que foi amplificada pela do transistor. Essa corrente, como sabemos, induzirá outra corrente alternada de mesma variação no secundário, mas com características de tensão e corrente transformadas, de maneira a poder acionar a bobina móvel do alto-falante.

Figura1 - Acoplamento inadequado.

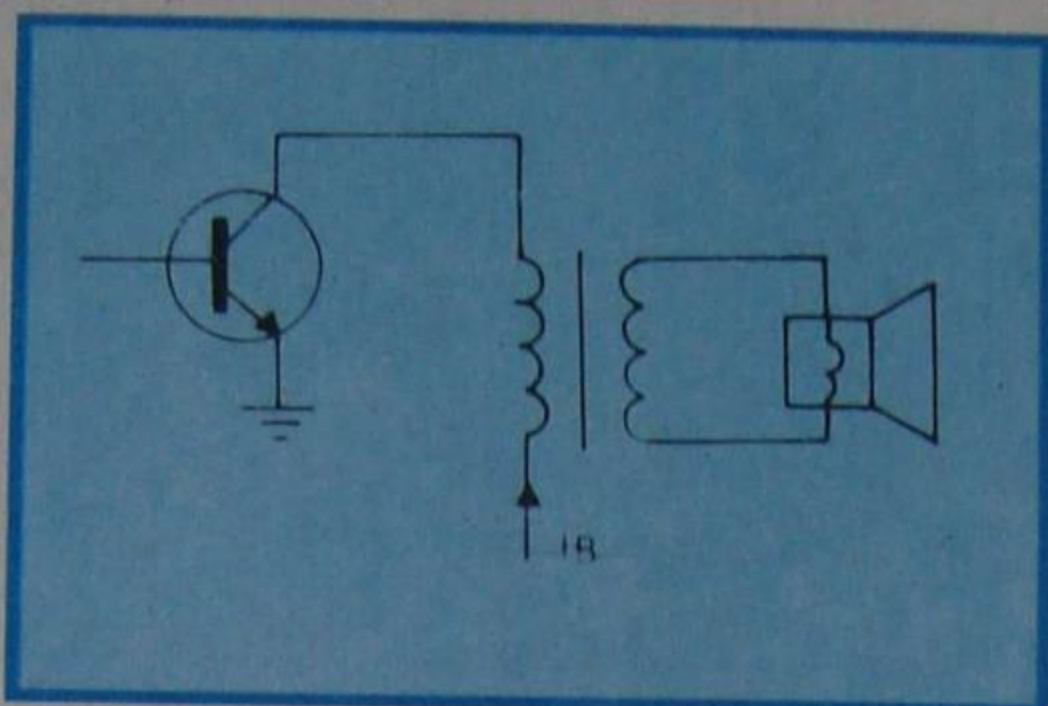



Figura 2 - Acoplamento por transformador.

II - Descrição física do transformador

Fisicamente, o transformador de audiofreqüência difere muito pouco do transformador de força que analisamos na lição anterior. De fato, constrói-se o transformador de audiofreqüência quase exclusivamente com núcleo do tipo blindado, de chapas El. Essas chapas são empilhadas, até perfazerem a secção desejada da perna central (secção do núcleo). Os enrolamentos são feitos em carretéis de papelão, fibra ou plástico, em camadas isoladas para os transformadores que funcionarão com tensão alta. Quando a tensão é de valor reduzido, como acontece para os circuitos transistorizados que funcionam com pilhas, por exemplo, não há necessidade de isolar as camadas.

As dimensões do transformador dependem de sua potência, da menor freqüência que ele deve reproduzir e da qualidade do ferro utilizado.

Como afirmamos linhas atrás, o tipo de núcleo mais utilizado na confecção de transformadores de áudio é o blindado. Na **figura 3** apresentamos o corte de um transformador de saída. Um detalhe que o aluno deve notar nos transformadores de áudio, em que um dos enrolamentos é atravessado também por corrente contínua, é que, entre as chapas do núcleo, sempre existe uma abertura, chamada **entreferro**, cuja finalidade é a de aumentar a relutância do circuito magnético, para evitar a saturação do núcleo.

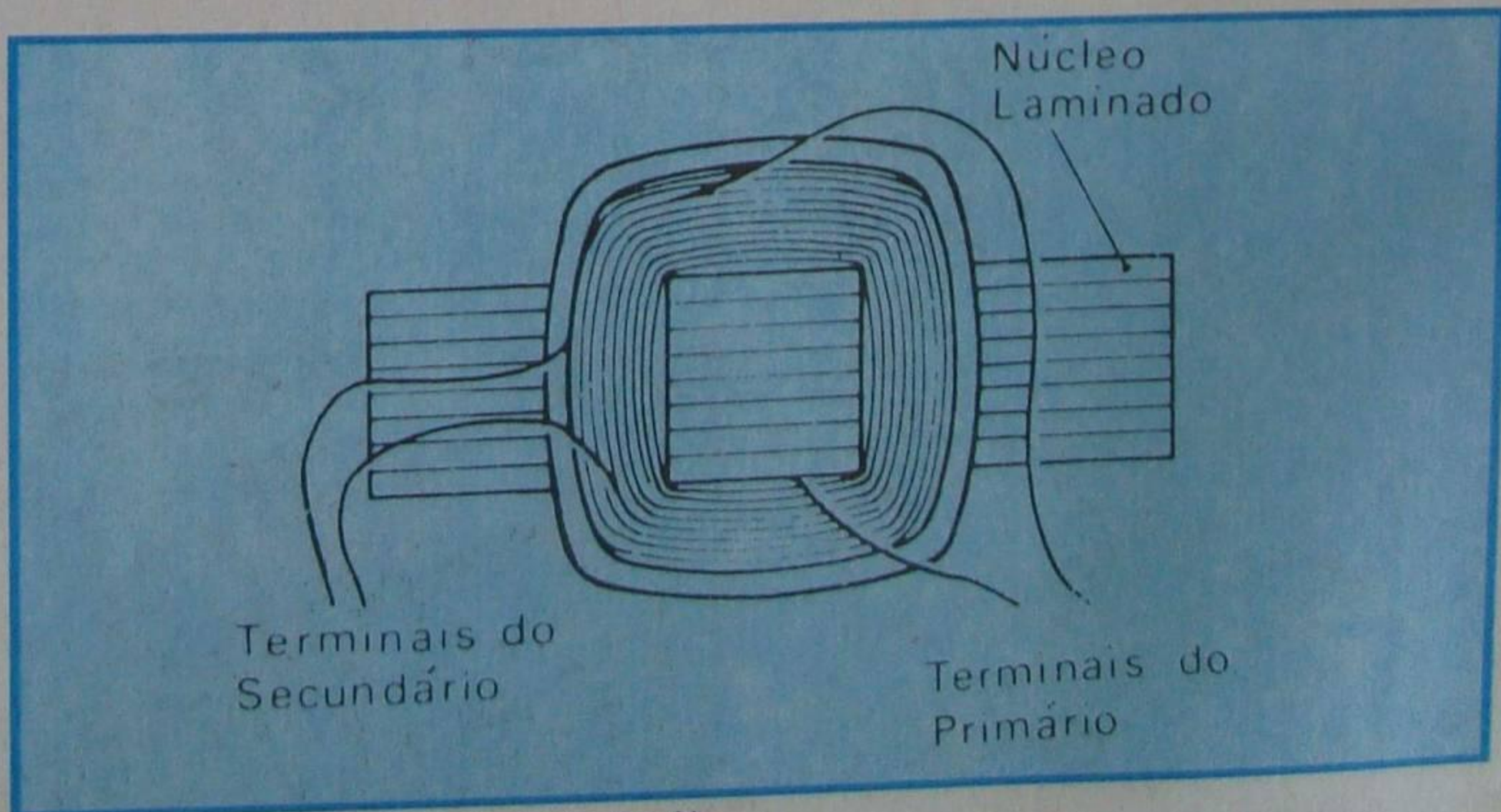



Figura 3 - Aparência física do transformador de saída.